

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

FACULTAD DE FARMACIA Y BIOQUÍMICA

E.A.P. FARMACIA Y BIOQUÍMICA

**Evaluación e interpretación de las concentraciones de
dióxido de nitrógeno y dióxido [de] azufre en el aire de
Lima Metropolitana**

TESIS

para optar al título profesional de Químico Farmacéutico

AUTORES

Abel Edu Sotomayor Torres

Gloria Marina Marín Vallejos

ASESORES

Mesías Moisés García Ortiz

José Alfonso Apesteguía Infantes

Lima – Perú

2010

DEDICATORIA

A mi padre Abel, por su contribución invaluable en mi formación como persona humana y como profesional; por sus sabios consejos y la perspectiva de vida que me inculcó.

A mi madre Eutropia, por ser el soporte moral de mi formación y la persona más sensible y emprendedora que he conocido.

A mis hermanos Allen y Andy, por ser mis socios de toda la vida, por los consejos y lecciones que aprendí de ustedes.

A mis hermanas Yoshi y Jasmine, por brindarme el más puro e incondicional sentimiento fraternal en cada acto o gesto que realizan día a día. Sin ustedes hubiera sido imposible llegar a cumplir ciertos objetivos en la vida.

Abel Edú Sotomayor Torres

DEDICATORIA

A Dios, con ÉL a mi lado todo es posible.

A mis padres Juan Francisco (†) y Adela por su apoyo incondicional, alentándome para conseguir las metas propuestas.

A mis hermanos Alejandro y Elena, ellos me infundieron el valor de los estudios y me apoyaron para ser la profesional que soy ahora.

Gloria Marina Marín Vallejos

AGRADECIMIENTOS

A Dios, porque sin Él nada es posible de realizar.

A nuestro asesor, el Dr. Moisés García Ortiz, por su apoyo incondicional y permanente durante todo el desarrollo de la tesis. Muchísimas gracias.

A todos los miembros del CICOTOX, por ser personas excepcionales que nos apoyaron en las diversas etapas de la realización del presente trabajo de investigación.

A los distinguidos miembros del jurado examinador y calificador:

- Q.F. Esp. Jesús Lizano (Presidente)
- Dr. Mario Carhuapoma Yance
- Q.F. Manuel Torres Roca
- Q.F. Juan Perez León Camborda

Por sus observaciones y sugerencias en la culminación del presente trabajo de investigación.

ÍNDICE

Página

RESUMEN

SUMMARY

I.- INTRODUCCIÓN.....	1
II.- HIPÓTESIS	3
III.- OBJETIVOS	3
3.1.- Objetivo General.....	3
3.2.- Objetivos Específicos.....	3
IV.- MARCO TEÓRICO	4
4.1.- Contaminación del aire.....	4
4.2.- Dióxido de Nitrógeno.....	14
4.3.- Dióxido de Azufre.....	26
4.4.- Estudios sobre Contaminación por Dióxido de Nitrógeno y Dióxido de Azufre.....	36
PARTE EXPERIMENTAL	
V.- EQUIPOS Y MATERIALES.....	40
5.1.- Equipos.....	40
5.2.- Materiales.....	40
VI.- TOMA DE MUESTRA.....	41
6.1.- Estaciones de muestreo.....	41
VII.- DIÓXIDO DE NITRÓGENO.....	42
7.1.- Método y fundamento.....	42
7.2.- Reactivos.....	43
7.3.- Técnica operatoria.....	43
7.4.- Curva de calibración.....	44
7.5.- Cálculo de las concentraciones.....	46
VIII.- DIÓXIDO DE AZUFRE.....	47
8.1.- Método y fundamento.....	47

8.2.- Reactivos.....	48
8.3.- Técnica operatoria.....	48
8.4.- Curva de calibración.....	49
8.5.- Cálculo de las concentraciones.....	50
IX.- RESULTADOS.....	52
X.- DISCUSIÓN.....	76
XI.- CONCLUSIONES.....	80
XII. RECOMENDACIONES.....	81
XIII.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82
XV.- ÍNDICE DE ANEXOS.....	87

ABREVIATURAS

$((\text{CH}_3)_2\text{S})$:	Disulfuro de Metilo
$(\text{CH}_3\text{SCH}_3)$:	Sulfuro de Dimetilo
%T	:	Porcentaje de Transmitancia
A	:	Absorbancia
CFC	:	Cloro Flúor Carbonados
CH_4	:	Metano
CO	:	Monóxido de Carbono
CO_2	:	Dióxido de Carbono
COS	:	Sulfuro de Carbonilo
COVs	:	Compuestos Orgánicos Volátiles
CS_2	:	Disulfuro de Carbono
CTX	:	CICOTOX (Centro de Información, Control Toxicológico y Apoyo a la Gestión Ambiental)
DIGESA	:	Dirección General de Salud Ambiental
D.S.	:	Decreto Supremo
ECA	:	Estándar de Calidad Ambiental
EDTA	:	Etilén Diamino Tetra Acético
EPA	:	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos
H_2O_2	:	Peróxido de Hidrógeno

H_2S	:	Sulfuro de Hidrógeno
H_2SO_3	:	Acido Sulfuroso
HC	:	Hidrocarburos
HCl	:	Acido Clorhídrico
HNO_2	:	Ácido Nitroso
HNO_3	:	Ácido Nítrico
K	:	Pendiente de la Curva
L/min	:	Litros por Minuto
M	:	Molaridad
MINAM	:	Ministerio del Ambiente
MINSA	:	Ministerio de Salud
mL	:	Mililitros
mmHg	:	Milímetros de Mercurio
N	:	Normalidad
NH_3	:	Amoníaco
nm	:	Nanómetros
NO_x	:	Óxidos de Nitrógeno
O_3	:	Ozono
$^{\circ}\text{C}$:	Grados Celsius
OMS	:	Organización Mundial de la Salud
PCM	:	Presidencia del Consejo de Ministros
ppb	:	Partes por Billón

ppm	:	Partes por Millón
PTS	:	Partículas Totales Suspendidas
R.M.	:	Resolución Ministerial
SENAMHI	:	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
$\text{SO}_4^{=}$:	Ión Sulfato
SO_x	:	Óxidos de Azufre
TCM	:	Tetra Cloro Mercurato
$\mu\text{g}/\text{m}^3$:	Microgramos por Metro Cúbico
μL	:	Microlitros
$\mu\text{L}/\text{mL}$:	Microlitros por mililitros
μm	:	Micrómetros
UNMSM	:	Universidad Nacional Mayor de San Marcos
UV	:	Ultravioleta
V	:	Volumen
ΔA	:	Diferencia de Absorbancias
λ	:	Longitud de Onda
λv	:	Longitud de Onda por Velocidad de la Luz

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se desarrolló en Lima Metropolitana. Se determinaron dos contaminantes atmosféricos: el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. El estudio se desarrolló entre los meses de noviembre y diciembre de 2009; donde se establecieron cinco estaciones de muestreo y se tomaron un total de 200 muestras. Los análisis se realizaron en el laboratorio del Centro de Información, Control Toxicológico y Apoyo a la Gestión Ambiental (CICOTOX) de la Facultad de Farmacia y Bioquímica de la UNMSM. El método empleado para la determinación de dióxido de nitrógeno fue de Griess – Saltzman y para determinar el dióxido de azufre se usó el método modificado de West Gaeke. Durante los meses de estudio, el promedio de las concentraciones de dióxido de nitrógeno fue de $60,294 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el cual se encuentra dentro del límite establecido por la Dirección General de Salud Ambiental ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y por encima del valor guía establecido por la Organización Mundial de la Salud ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$). El promedio de las concentraciones de dióxido de azufre fue de $35,121 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el cual está dentro del límite establecido por la Dirección General de Salud Ambiental ($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y por encima del valor guía establecido por la Organización Mundial de la Salud ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Palabras clave: Dióxido de nitrógeno, Dióxido de azufre, Dirección General de Salud Ambiental, Organización Mundial de la Salud.

SUMMARY

This research work was developed in Lima Metropolitana. There were identified two air pollutants, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. The investigation was conducted from November to December 2009, which set five sampling stations and took a total of 200 samples. Analysis was performed at the Toxicological Control, Information and Environmental Management Support Center (CICOTOX), Faculty of Pharmacy and Biochemistry, San Marcos University. The method for determining nitrogen dioxide was Griess-Saltzman and to determine sulfur dioxide was used the modified method of West Gaeke. During the months of research, average concentrations of nitrogen dioxide was 60,294 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, which is within the limit set by the Environmental Health Department (100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), and above the guideline value set by the World Health Organization (40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). The average concentrations of sulfur dioxide was 35,121 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, which is within the limit established by the General Directorate of Environmental Health (80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), and above the guideline value set by the World Health (20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Keywords: Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide, Department of Environmental Health, World Health Organization.

I.- INTRODUCCIÓN

El medio ambiente y el desarrollo son, inevitablemente, dos conceptos ligados. El desarrollo genera una serie de daños y perturbaciones, dentro de los cuales el más importante es la contaminación, que es una amenaza constante para el medio ambiente.

Cuando la composición del aire cumple con los porcentajes de existencia de los diferentes gases que en él se encuentran, hablamos del concepto de “aire puro” y decimos que en esta circunstancia la atmósfera terrestre se encuentra en el llamado “equilibrio ecológico”; pero ambas definiciones son sólo concepciones ideales, pues la dinámica atmosférica y, más aún, los efectos de la actividad humana han alterado estos estados ideales, convirtiéndolos en sistemas caóticos; sin embargo sus componentes químicos aún cumplen con propiedades cinéticas específicas.

La contaminación del aire sigue representando una amenaza importante para la salud en todo el mundo. Según una evaluación de la Organización Mundial de Salud (OMS) de la carga de enfermedad debida a la contaminación del aire, son más de dos millones las muertes prematuras que se pueden atribuir cada año a los efectos de la contaminación del aire. Más de la mitad de esta carga de enfermedad recae en las poblaciones de los países en desarrollo.¹

En 1987, la Oficina Regional para Europa de la OMS publicó las guías para la calidad del aire de Europa. A partir de este documento se empezó a regular a nivel mundial la calidad del aire principalmente en las grandes ciudades. Estas han sido mejoradas hasta llegar a la actual Guía de Calidad del Aire de la OMS (actualizado al 2005); la cual establece parámetros mucho más rigurosos sobre la concentración de contaminantes atmosféricos, con el fin principal de proteger la salud de las personas.

Se ha comprobado también que la adecuada gestión de la calidad del aire mejora la salud pública, ya que la contaminación está asociada con el

incremento de pacientes ambulatorios, de ingresos a hospitales y de mortalidad debido a enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Alrededor del 20 a 30% de todas las enfermedades respiratorias ocurren por la contaminación del aire. Se supone que sin aire limpio, el desarrollo económico adecuado se vuelve prácticamente imposible y los conflictos sociales, inevitables.²

En el Perú, igual que en otras partes del mundo la contaminación del aire es un problema de tipo sanitario y debe ser abordado considerando los verdaderos efectos que tiene sobre la salud de la población y sobre el medio ambiente.

En el año 2001 fue aprobado el Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire, según D.S. 074-2001-PCM; este documento regula actualmente los niveles de Dióxido de Nitrógeno en el aire, en nuestro país. Además señala que el monitoreo de la calidad del aire y la evaluación de los resultados en el ámbito nacional es una actividad de carácter permanente, a cargo del Ministerio de Salud a través de la Dirección General de Salud Ambiental.³

Asimismo, en el año 2008, fueron aprobados los Estándares de Calidad Ambiental para el Aire, según D.S. 003-2008-MINAM; el cual regula en la actualidad los niveles de Dióxido de Azufre en el aire, en nuestro país.⁴ Además en febrero de este año, el Ministerio del Ambiente (MINAM) ha elaborado a nivel de proyecto de Decreto Supremo, el Reglamento para la Implementación de los Estándares de Calidad Ambiental para el Aire; el cual al ser aprobado debe convertirse en el documento oficial de regulación de la calidad del aire en el Perú.⁵

A pesar de existir legislación ambiental y monitoreo de la calidad del aire, consideramos que no es suficiente lo que se está haciendo para conocer la calidad del aire en Lima Metropolitana, siendo éste el objetivo principal del presente estudio; el cual debe ser base para desarrollar investigaciones posteriores que midan el impacto de este tipo de contaminación sobre la salud de la población y sobre el medio ambiente.

II.- HIPÓTESIS

- Las concentraciones de dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre en Lima Metropolitana, se encuentran por encima de los estándares de calidad ambiental establecidos por la Dirección General de Salud Ambiental y por la Organización Mundial de la Salud.

III.- OBJETIVOS

3.1.- Objetivo general

- Establecer una línea base de investigación como instrumento de gestión ambiental en la calidad del aire; a partir de la evaluación de las concentraciones de dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre en el aire de Lima Metropolitana.

3.2.- Objetivos específicos

- Determinar las concentraciones de dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre en el aire de Lima Metropolitana.
- Evaluar la variación de las concentraciones de dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre, debido a factores climatológicos.
- Aportar información para estudios epidemiológicos, monitoreo ambiental y auditorías ambientales con relación al dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre.

IV.- MARCO TEÓRICO

4.1.- Contaminación del aire

El ecosistema terrestre tiende a mantener el equilibrio constante gracias a las capacidades de sus componentes, biótico y abiótico, de descomposición, asimilación y transformación. Este equilibrio se ve alterado, en la atmósfera, cuando los contaminantes son inyectados al aire o cuando la proporción de sus componentes no es natural, como sucede al formarse los óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x), monóxido de carbono (CO), etc. Es a este nivel que cabe el término de contaminación atmosférica. A partir del rompimiento de este equilibrio, la atmósfera contaminada afecta la salud humana, el clima, el cultivo de alimentos y la existencia misma de varias especies. Por este motivo el interés público de los efectos de la contaminación debe ir en aumento y ser comprendido en su total magnitud.

Los contaminantes del aire pueden encontrarse en forma gaseosa, líquida o sólida en el rango de temperaturas habituales en el medio ambiente. Los contaminantes en estado gaseoso son gases o vapores dispersos en el aire, normalmente tan diluidos que el comportamiento del conjunto es equiparable al del aire limpio. Las propiedades de la mezcla diluida pueden describirse habitualmente mediante la ecuación de los gases ideales.

La contaminación atmosférica suele clasificarse en dos tipos genéricos: la **contaminación de tipo reductora**, característica de la combustión incompleta de carbón y otros combustibles fósiles, en la que predominan como agentes contaminantes el dióxido de azufre y la materia particulada (humo); y la **contaminación de tipo oxidante**, con predominio de los hidrocarburos volátiles, óxidos de nitrógeno y oxidantes fotoquímicos; como agentes contaminantes.

La contaminación oxidante está causada por las reacciones químicas, en el medio ambiente atmosférico, de compuestos orgánicos volátiles procedentes de instalaciones de almacenamiento y fuentes industriales difusas, y de los gases de escape de los motores de explosión. La contaminación de este tipo se presenta con más frecuencia en zonas con fuerte radiación solar, donde las masas de aire quedan a menudo atrapadas en capas de inversión sometidas a diversas reacciones fotoquímicas.⁶

La contaminación fotoquímica tiene una relevancia indudable en nuestro país por las características climáticas; favorables tanto para la emisión de vapores a la atmósfera (altas temperaturas) como para mantener elevados niveles de reactividad fotoquímica (alta radiación solar).⁷

A diferencia de la contaminación reductora tradicional, que posee un mayor carácter local y tiende a quedar circunscrita a un área geográfica relativamente próxima a los focos de emisión, la contaminación fotoquímica posee una notable capacidad para afectar a zonas alejadas de los núcleos urbanos e industriales donde se encuentran los focos emisores. Por esta razón, se detectan niveles altos de contaminantes como el ozono en zonas rurales, ocasionados por el movimiento de las masas de aire contaminado.⁸

Los contaminantes atmosféricos también se clasifican, atendiendo a su origen, como **primarios** y **secundarios**.

Los contaminantes primarios son los emitidos como tales desde los focos estacionarios o móviles de los que proceden. Son contaminantes primarios, por consiguiente, el dióxido de azufre, la materia particulada, los compuestos orgánicos volátiles (COVs) o los óxidos de nitrógeno.

Los contaminantes secundarios son los generados en la propia atmósfera a partir de los contaminantes primarios, por reacciones químicas o, en muchas ocasiones, fotoquímicas. El ozono es, por tanto, uno de los principales contaminantes secundarios.

4.1.1.- Fuentes de contaminación

Las alteraciones de la composición del aire pueden tener un doble origen:⁹

a) **Natural o biogénico:** Erosión del suelo, descomposición de la materia orgánica, radiación natural, sal marina, erupciones volcánicas, incendios forestales, meteoritos, etc.

b) **Artificial o antropogénico:** Residuos gaseosos domésticos, residuos industriales, residuos del parque automotor, residuos radiactivos, etc.

- Se trata de una contaminación localizada.
- Las emisiones se producen en puntos geográficos donde la existencia de sumideros es menor. Normalmente, la naturaleza es un sumidero importante. En las áreas urbanas o industriales, que es donde mayormente se producen las emisiones antropogénicas a la atmósfera, la presencia de asfalto, cemento, materiales de construcción diversos, etc., hace que la cantidad de especies vegetales o de suelo que pueden actuar como sumidero sea sensiblemente inferior a la de una zona rural.
- La difusión de los contaminantes depende de la climatología. Los factores meteorológicos no siempre van a ser los mismos y, en determinadas condiciones, podrán producirse episodios de contaminación de mayor gravedad.
- La capacidad de algunos agentes contaminantes de sufrir transformaciones provoca la aparición de compuestos totalmente ausentes en la composición del aire natural. ⁶

Además, considerando la localización del contaminante, podemos clasificar a estos en **fuentes móviles**, donde se incluyen los diversos tipos de vehículos de motor utilizados en el transporte, y **fuentes fijas**, las cuales son focos de combustión estacionaria y se dividen en industriales, domésticos y vertederos.

En el cuadro 1 se presenta un resumen de los orígenes y de los efectos en la salud humana y el medio ambiente de los principales contaminantes atmosféricos. ⁶

Cuadro 1. Orígenes y efectos de los contaminantes atmosféricos.

Contaminantes	Fuentes antropogénicas	Fuentes biogénicas	Efectos
Dióxido de carbono (CO ₂)	- Combustión	- Descomposición de materia orgánica. - Procesos drespiratorios	- Efecto invernadero.
Monoóxido de carbono (CO)	- Combustión (especialmente en el automotor)	- Reacciones de terpenos. - Incendios forestales.	- Disminuye absorción de oxígeno por las células rojas.
Dióxido de azufre (SO ₂)	- Combustión de carbón y petróleo. - Cocido de minerales sulfurados. - Leña.	- Emisiones volcánicas.	- Lluvia ácida.
Óxidos de nitrógeno (NO _x)	- Combustión - Aplicación de fertilizantes nitrogenados.	- Interacciones biológicas de suelos y aguas.	- Incrementan infecciones respiratorias. - Disminuye función pulmonar en asmáticos - Lluvia ácida.
Hidrocarburos (HC)	- Combustión, evaporación de combustibles y pinturas - Refinerías e industrias químicas.	- Procesos biológicos.	- Policíclicos: efectos cancerígenos. - Precursores para la formación de ozono.
Ozono (O ₃)	- Fotocopiadoras.	- Disociación homolítica de NO ₂ por radiación solar. - Oxidación de hidrocarburos.	- Altamente irritante para ojos y pulmón. - Disminución de cosecha
Material particulado	- Combustión. - Procesos industriales.	- Erosión de suelos. - Polen en la vegetación.	- Medio de transporte para metales pesados e hidrocarburos.
Plomo (Pb)	- Aditivo en gasolina. - Actividades industriales. - Insumos agrícolas	- Emisiones volcánicas	- Daños neurológicos. - Reducción de la capacidad de aprendizaje en niños.

Orosco, 2003.⁶

4.1.2.- Transporte y dispersión de los contaminantes atmosféricos

La concentración de contaminantes en la atmósfera está influenciado por factores diversos, dentro de los cuales es preciso incidir en dos conceptos importantes: **emisión**, el cual está definido como la concentración de contaminantes que vierte un foco determinado y se mide a la salida del foco emisor; e **inmisión**, definido como la concentración de contaminantes presente en el seno de una atmósfera determinada y, por tanto, es a estos valores a los que están expuestos los seres vivos y los materiales cuya actividad se desarrolla en esa atmósfera concreta. Los valores correspondientes a unas y otras concentraciones suelen ser totalmente distintos. Los valores de inmisión son consecuencia no sólo de los valores de emisión, sino también de todos los fenómenos de mezcla, transporte, deposición y transformaciones químicas que experimentan los contaminantes una vez emitidos a la atmósfera. Este hecho manifiesta la importancia que van a tener. Por un lado los fenómenos meteorológicos, pues son ellos los que contribuyen a la mezcla y transporte de los contaminantes, y por otro lado, las posibles transformaciones químicas que pueden sufrir las sustancias una vez emitidas en el seno de la atmósfera. En el gráfico 1 se esquematiza estos procesos y se señalan expresamente cuales serían los valores de emisión e inmisión.¹⁰

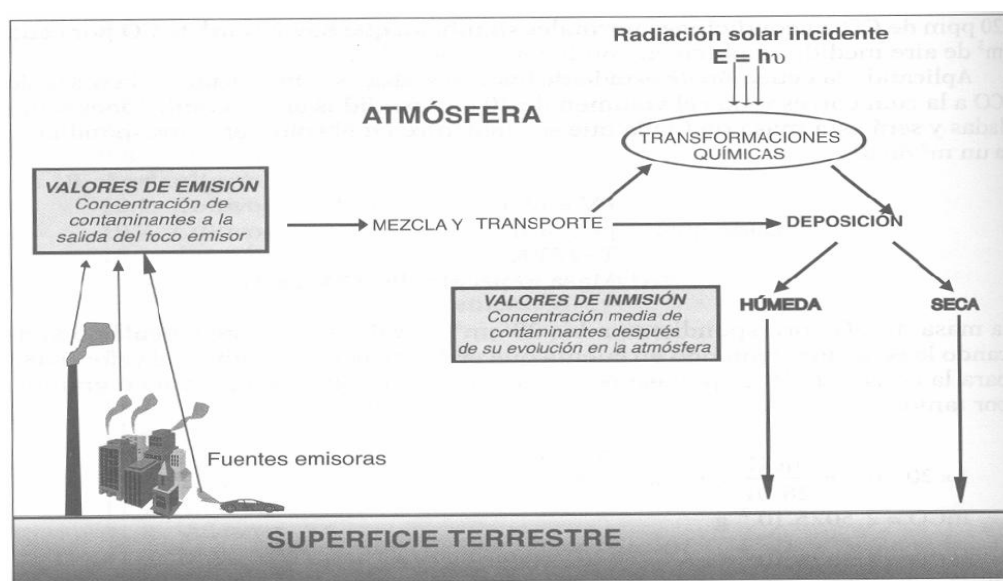


Gráfico 1. Emisión y evolución de los contaminantes en la atmósfera.

Seoáñez, 2002.

El transporte y dispersión de contaminantes del aire ambiental están influenciados por complejos factores: las variaciones globales y locales del clima y las condiciones topográficas locales. En una escala mundial, las variaciones del clima influyen sobre el movimiento de los contaminantes. A nivel local los principales factores de transporte y dispersión son el viento y la estabilidad.¹⁰

Los factores que influyen en el transporte y dispersión de los contaminantes del aire son:

TURBULENCIA TERMAL: La temperatura atmosférica disminuye en 1 °C por cada 100 metros de altura. Este fenómeno favorece la subida del aire caliente superficial y contaminado, y la bajada del aire frío y puro.¹¹

INVERSIÓN TERMICA: En la noche, con suelo frío no se puede calentar el aire superficial como para favorecer su penetración en las capas superiores, como consecuencia el aire superficial contaminado queda cerrado sobre la superficie del suelo. Es un fenómeno que causa una estabilidad atmosférica fuerte por generar capas de estratificación isothermal estables, capaces de bloquear totalmente los intercambios verticales.¹²

4.1.3.- Rol de la meteorología en la contaminación

La contaminación del aire es un fenómeno que está sujeto totalmente a las corrientes atmosféricas. El viento puede transportar a los contaminantes a muchos kilómetros de su punto emisor, extendiéndose por amplias regiones. Asimismo las condiciones de radiación solar y humedad, pueden favorecer o desfavorecer la formación de contaminantes secundarios; los factores meteorológicos que determinan la concentración de los contaminantes en el aire son: el viento, la topografía, las precipitaciones, la radiación solar, la temperatura.

4.1.4.- Efectos de la contaminación del aire

Existe evidencia real de que la contaminación del aire afecta la salud de las personas y animales, daña la vegetación, ensucia y deteriora los materiales, afecta el clima, reduce la visibilidad y la radiación solar, perjudica los procesos

de producción, aumenta los riesgos, en general dificulta el disfrute de la vida y de las cosas.

4.1.4.1.- Efectos sobre el medio ambiente

Entre los efectos que produce la contaminación del aire podemos encontrar a la formación de smog, smog industrial, smog fotoquímico, destrucción de la capa de ozono, la lluvia ácida, el efecto invernadero, el cambio climático, entre otros.

SMOG FOTOQUÍMICO

Se denomina smog fotoquímico a la contaminación del aire, principalmente en áreas urbanas, por ozono originado por reacciones fotoquímicas, y otros compuestos como el dióxido de nitrógeno. Como resultado se observa una atmósfera de un color marrón rojizo.⁶

LLUVIA ÁCIDA

En la atmósfera los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los óxidos de azufre (SO_x) son convertidos en ácido nítrico y sulfúrico que vuelven a la tierra con las precipitaciones de lluvia o nieve (lluvia ácida). Otras veces, aunque no llueva, van cayendo partículas sólidas con moléculas de ácido adheridas (deposición seca).

En la gráfico 2 podemos apreciar las reacciones químicas que ocurren tanto con el dióxido de nitrógeno como con el dióxido de azufre, que por acción de los rayos solares o del agua de las lluvias (o el vapor de agua en algunos casos), van a formar la llamada lluvia ácida.¹³

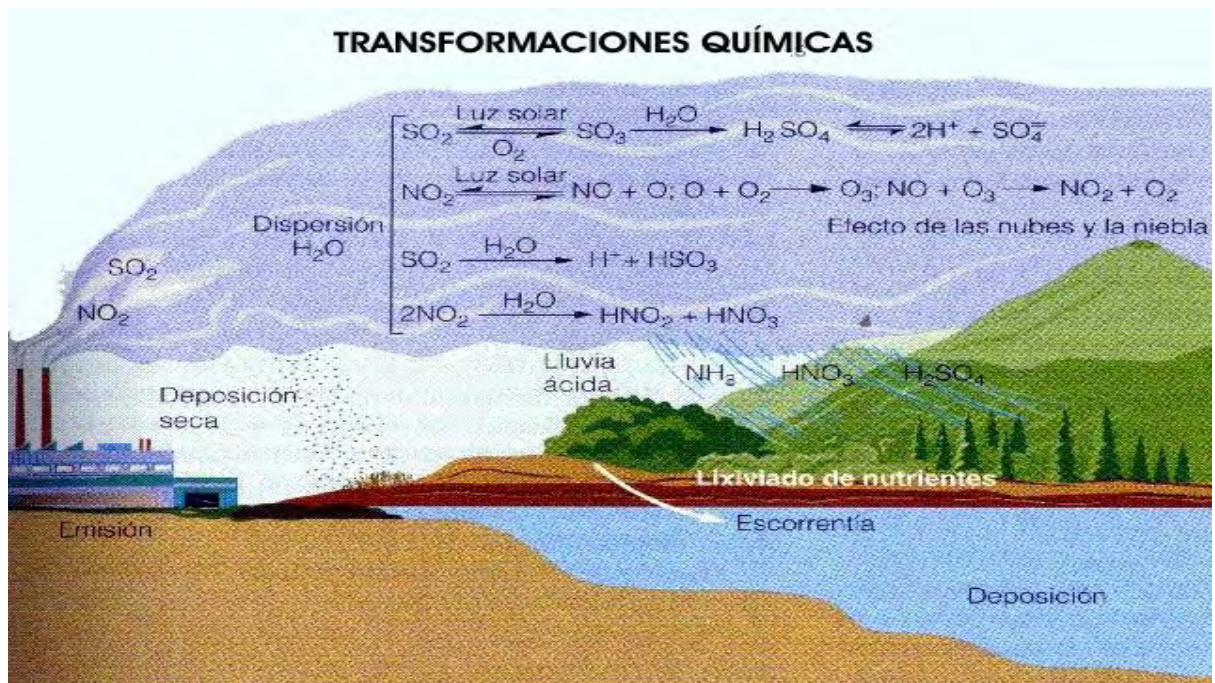


Gráfico 2. Transformaciones químicas en la formación de la lluvia ácida.
Inche, 2004.

EFFECTO INVERNADERO

La superficie de la tierra es calentada por el sol. Pero ésta no absorbe toda la energía sino que refleja parte de ella de vuelta hacia la atmósfera. Alrededor del 70% de la energía solar que llega a la superficie de la tierra es devuelta al espacio. Pero parte de la radiación infrarroja es retenida por los gases que producen el efecto invernadero y vuelve a la superficie terrestre. Como resultado del efecto invernadero la tierra se mantiene lo suficientemente caliente como para hacer posible la vida sobre el planeta.

Hay un aumento en las concentraciones de los gases de invernadero: el CO_2 , el CH_4 , los clorofluorocarbonados (CFC), el óxido de nitrógeno (N_2O) y el ozono troposférico.

La radiación solar pasa a través de ellos, pero atrapan y conservan el calor de la radiación infrarroja reflejada por la superficie del suelo, aumentando así la temperatura baja de la atmósfera. ¹⁴

CAMBIO CLIMÁTICO

A partir de 1979 los científicos comenzaron a afirmar que un aumento al doble de la concentración del CO₂ en la atmósfera supondría un calentamiento medio de la superficie de la tierra de aproximadamente 4 °C.

Estudios más recientes sugieren que el calentamiento se produciría más rápidamente sobre la tierra que sobre los mares, se calcula que para el 2100 se dará un cambio rápido y profundo, lo cual significaría un aumento de la temperatura de la tierra entre 1,4 °C y 5,8 °C. Asimismo el calentamiento se produciría con retraso con respecto al incremento en la concentración de los gases con efecto invernadero. Al principio los océanos más fríos tenderán a absorber una gran parte del calor adicional retrasando el calentamiento de la atmósfera. Sólo cuando los océanos lleguen a un nivel de equilibrio con los más altos niveles de CO₂ se producirá el calentamiento final.¹⁵

En lo que respecta al deshielo en los polos, la situación es aún más preocupante, pues en los últimos 30 años la masa de los glaciares ha disminuido con mucha más rapidez que en los últimos siglos.⁹

Los glaciares tropicales peruanos retrocedieron en un 22% durante los últimos 25 años, con lo que se ha perdido un equivalente al agua que consume Lima en 10 años.¹⁶

4.1.4.2.- Efectos sobre la salud

Para determinar los efectos que tienen los contaminantes sobre la salud humana, es preciso conocer el lugar exacto, en el organismo vivo, donde va a ejercer su efecto negativo. El diámetro aerodinámico de los contaminantes, y la concentración relativa van a tener un comportamiento característico en el organismo y van a ser absorbidos en diferentes tramos de las vías respiratorias. Según el tamaño de las partículas, éstas van a permanecer en mayor proporción en determinadas estructuras del árbol respiratorio; facilitando de este modo el proceso de absorción del contaminante.¹³

La contaminación del aire tiene un efecto directo sobre la salud humana. En casos extremos, ha causado muertes como resultado de la combinación de características geográficas inusuales con factores climáticos. Los contaminantes atmosféricos liberados por los vehículos automotores tienen diferentes efectos nocivos sobre la salud de los seres humanos. La inhalación es la principal ruta de exposición a los contaminantes del aire originado por las emisiones de los vehículos.

Asimismo existen otras vías de exposición, como la contaminación del agua potable, la contaminación de los alimentos y la absorción a través de la piel. La exposición por inhalación afecta los sistemas respiratorio, nervioso y cardiovascular de los seres humanos, provocando deficiencias pulmonares, distintas enfermedades, e incluso la muerte. Los contaminantes del aire, tanto gaseosos como particulados, pueden tener efectos negativos sobre los pulmones. En el gráfico 3 se describen los principales efectos de los contaminantes del aire sobre el sistema respiratorio.

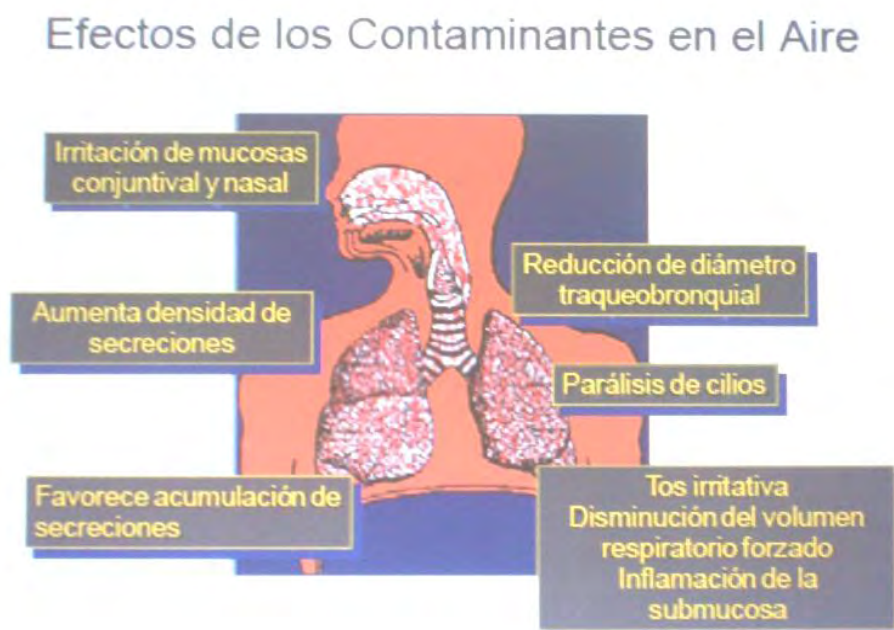


Gráfico 3. Efectos de los contaminantes del aire sobre el sistema respiratorio. MINAM, 2009.

4.1.5.- Normatividad

4.1.5.1.- Normatividad internacional

Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre.¹

4.1.5.2.- Normatividad nacional

- Ley 28611: Ley General del Ambiente.¹⁷
- D.S. N°003-2008-MINAM. Estándares de Calidad Ambiental para Aire.¹⁸
- D.S. N° 074-2001-PCM. Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Aire.¹⁹

4.2.- Dióxido de Nitrógeno (NO₂)

4.2.1.- Propiedades fisicoquímicas

El dióxido de nitrógeno es un gas pardo amarillento, ligeramente rojizo, a temperatura normal es muy volátil. Su olor es irritante y se disuelve en el agua, ya que reacciona con ella. A temperaturas inferiores a -10 °C se polimeriza en su dímero N₂O₄, coexistiendo ambos, y al aumentar la temperatura se disocia el dímero. Por encima de 200°C, el dióxido de nitrógeno se disocia en NO y oxígeno. El NO₂ es más denso que el aire.

El NO₂ es un agente oxidante muy fuerte, y actúa como comburente frente a materiales combustibles. Se disuelve en muchos compuestos orgánicos (sulfuro de carbono, hidrocarburos halogenados, etc.). Reacciona con el agua dando una mezcla de ácidos nítricos y nitrosos. En seco, no atacan a los metales, pero sí en presencia de humedad, por formarse ácido nítrico. El NO₂ a grandes temperaturas se descompone en NO y oxígeno.²⁰

Los óxidos de nitrógeno se clasifican según estado de oxidación del nitrógeno, como se presentan en el cuadro 2:

Cuadro 2. Óxidos de nitrógeno presentes en la atmósfera.

NOMBRE	FÓRMULA QUÍMICA
Óxido nitroso	N ₂ O
Óxido nítrico	NO
Dióxido de nitrógeno	NO ₂
Trióxido de dinitrógeno	N ₂ O ₃
Tetróxido de dinitrógeno	N ₂ O ₄
Pentóxido de dinitrógeno	N ₂ O ₅

Pascual, 2009.²³

4.2.2.- Fuentes de emisión

NATURALES

Los óxidos de nitrógeno se generan de manera natural por actividad bacteriana, oxidación del amoníaco, quema de biomasa, emisión de suelos, emisión de océanos, emisiones volcánicas, y por descargas eléctricas atmosféricas.²¹

ANTROPOGÉNICAS

La mayor fuente de emisiones de óxidos de nitrógeno es el uso de combustibles fósiles por fuentes fijas y móviles, aunque también se producen

óxidos de nitrógeno durante la fabricación de ácido nítrico, el uso de explosivos, uso de gas licuado de petróleo y el proceso de soldadura.

4.2.3.- Efectos sobre la salud

INTOXICACIÓN AGUDA

En varios estudios experimentales de toxicología humana de corta duración se han notificado efectos agudos en la salud tras la exposición a concentraciones de más de 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de dióxido de nitrógeno, durante una hora. Aunque el nivel más bajo de exposición al NO_2 que ha mostrado un efecto directo en la función pulmonar de los asmáticos en más de un laboratorio es de 560 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, los estudios realizados sobre la capacidad de respuesta bronquial en los asmáticos parecen indicar que aumenta con niveles superiores a 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.¹

Los contaminantes atmosféricos cuyas partículas son pequeñas, como en el caso del NO_2 , ingresan hasta las partes más finas del sistema respiratorio de los seres humanos (alvéolos), donde se depositan y causan sus efectos más letales en el organismo.¹³

INTOXICACIÓN CRÓNICA

Se ha comprobado en estudios epidemiológicos que los síntomas de bronquitis de los niños asmáticos aumentan en asociación con la concentración anual de NO_2 , y que el menor aumento de la función pulmonar en los niños está vinculado a concentraciones elevadas de NO_2 en comunidades ya sometidas a los niveles actuales en el medio ambiente urbano.

En estudios recientes realizados en espacios cerrados, se han obtenido pruebas de efectos en los síntomas respiratorios de los lactantes con concentraciones de NO_2 por debajo de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Estas asociaciones no se pueden explicar completamente por la exposición simultánea a las partículas totales suspendidas (PTS) en el aire.¹

A continuación se relaciona la exposición al NO_2 en un rango de concentración y por un tiempo determinado, con los efectos que éste produce en el

organismo, específicamente en el sistema respiratorio. Podemos observar en el cuadro 3 que basta la exposición de unos minutos para sentir alguna sintomatología de la enfermedad respiratoria, y ni que decir de exposiciones de más de una hora a elevadas concentraciones.

Cuadro 3. Efectos en la salud por exposición al dióxido de nitrógeno.

CONCENTRACIÓN (ppm)	TIEMPO DE EXPOSICIÓN	EFFECTO OBSERVADO
5	14 horas	Individuos normales, incremento de la resistencia de las vías aéreas. Aumento de la hiperreactividad bronquial.
2,5	2 horas	Individuos normales: incremento de la resistencia de las vías aéreas.
1	2 horas	Individuos normales: pequeño cambio en la capacidad vital forzada.
0,5 – 5	3 – 60 minutos	Individuos con bronquitis crónica: Incremento de la resistencia de las vías aéreas.
0,5	20 minutos	Individuos asmáticos: con 10 minutos de ejercicio moderado: disminución de la tasa máxima de flujo expiratorio.

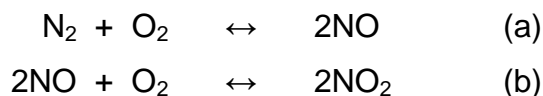
OMS, 2005. ¹

Evidencias recientes de animales de prueba indican que el dióxido de nitrógeno puede favorecer la diseminación del cáncer, en especial del mortífero melanoma, a través del cuerpo.²²

4.2.4.- Toxicocinética del dióxido de nitrógeno

La mayor parte del NO₂ atmosférico se emite en forma de NO, que se oxida rápidamente a NO₂ por acción del ozono.

El nitrógeno existente en el aire, como componente normal, actúa como comburente, gracias a esto se pueden desarrollar las siguientes reacciones químicas:



La reacción (a) es una reacción altamente endotérmica que sólo tiene lugar en extensiones apreciables a temperaturas muy elevadas (1300 a 2500 °C)

La reacción (b) no tiene lugar en extensión importante en las condiciones de combustión ordinarias, debido a la inestabilidad del NO₂ a temperaturas elevadas. De hecho, a 150 °C comienza a descomponerse en NO y O₂ y a 600 °C la descomposición es ya prácticamente completa. Además, la velocidad de esta segunda reacción es muy pequeña a temperaturas bajas, así, a 20 °C, si la concentración de NO es del orden de 12 500 mg/m³, tarda en torno a 3,6 minutos en oxidarse en un 90%, pero si la concentración es de 1,25 mg/m³, el tiempo necesario para llegar a este porcentaje de oxidación es del orden de 648 horas, y en 24 horas sólo se consigue una oxidación del 25%.

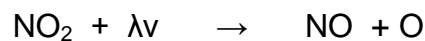
Podríamos pensar que sería interesante emplear temperaturas bajas de combustión para evitar la formación de óxidos de nitrógeno y utilizar mezclas ricas en combustible, sin embargo esta última propuesta conduciría a altos valores de CO e hidrocarburos por ineficiencia de la combustión. Por lo que las investigaciones se orientan a operar en condiciones de formación de mínimo CO y eliminar, o minimizar, la formación de los óxidos de nitrógeno recurriendo a controles de la temperatura de combustión.⁶

CICLO FOTOLÍTICO DE LOS ÓXIDOS DE NITRÓGENO

La relación NO_2/NO existente en la atmósfera es mayor de los que cabría esperar; dada la afirmación que acabamos de hacer respecto a la inestabilidad del NO_2 a altas temperaturas y, por tanto, las bajas tasas de emisión de NO_2 en los procesos de combustión. Sin embargo, el NO que se incorpora a la atmósfera experimenta una lenta pero constante oxidación a NO_2 . Ambos óxidos se ven implicados en un ciclo, llamado *ciclo fotolítico de los óxidos de nitrógeno*, que es causa de la aparición de un contaminante secundario importante, de gran poder oxidante, el ozono.

El ciclo, representado en el gráfico 5, transcurre a través de una serie de procesos como los que a continuación se indican:

- a) El NO_2 absorbe radiación de longitud de onda del orden de $\lambda = 380\text{nm}$, disociándose en NO y oxígeno atómico



- b) El oxígeno atómico así producido reacciona con oxígeno molecular, originando *ozono*, apareciendo así un contaminante secundario de alto carácter oxidante



- c) El ozono formado puede ahora reaccionar con NO originando de nuevo NO_2 y liberando oxígeno molecular

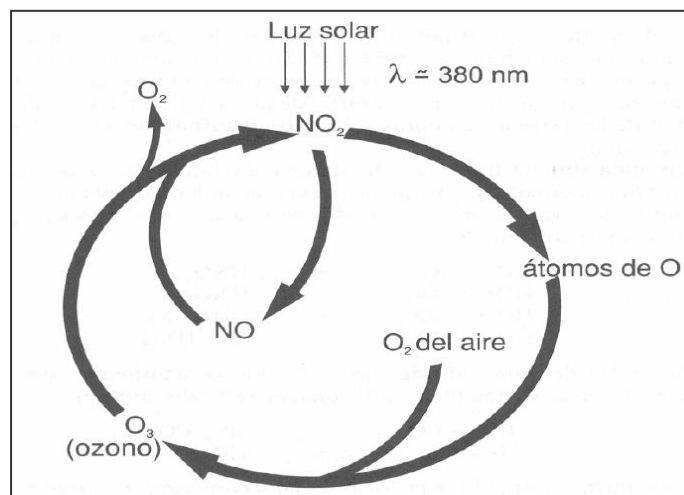
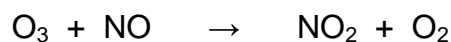


Gráfico 4. Ciclo fotolítico de los óxidos de nitrógeno.

Orosco, 2003.

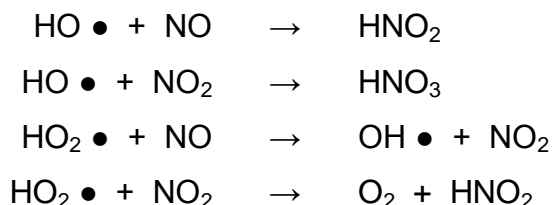
Si en este ciclo no se introdujera ningún otro tipo de perturbación, las concentraciones de NO y NO₂ permanecerían constantes en sus valores de equilibrio, según la tasa de emisión y la intensidad de radiación existente. Por el contrario, la presencia de otros contaminantes en el medio, en concreto de hidrocarburos, puede alterar notablemente el ciclo y conducir a la aparición de importantes contaminantes secundarios.⁶

EVOLUCIÓN DE LOS NO_x EN LA ATMÓSFERA

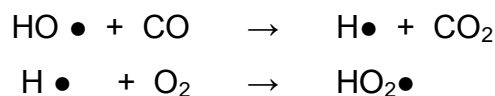
Oxidación atmosférica

Los NO_x emitidos a la atmósfera evolucionan de forma compleja, siguiendo mecanismos que, si bien no se consideran aún definitivamente determinados, se postula que pueden transcurrir a través de procesos como los que a continuación se indican. Se distingue la química diurna de la nocturna, pues la diferente concentración de las especies en horas solares o nocturnas determina los mecanismos de reacción.

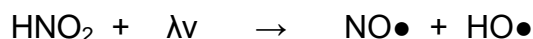
La **química diurna** transcurre fundamentalmente a través de los radicales libres hidroxilo e hidroperoxilo, y constituyen una vía secundaria de evolución de los óxidos de nitrógeno, ya que sus velocidades de reacción son menores que las del ciclo fotolítico ya comentado.



La presencia de monóxido de carbono como contaminante, sobre todo en atmósferas urbanas, es una fuente adicional de radicales hidroperoxido.



El ácido nitroso formado se puede disociar y comenzar de nuevo la cadena de reacciones:

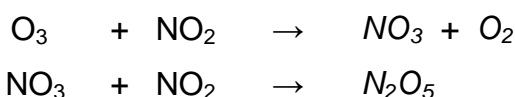


La desaparición de radicales hidropéroxido puede producirse por formación de peróxido de hidrógeno, especie que se ha encontrado en las nieblas fotoquímicas

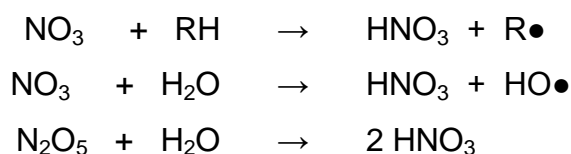


La posible existencia de hidrocarburos en la tropósfera introduce procesos alternativos en la evolución de los óxidos de nitrógeno, como ocurre en la formación del smog, revisado anteriormente. Así, los radicales hidropéroxido pueden inducir la formación de NO_2 a partir de NO o también generar nitratos a partir del NO_2 (nitrato de peroxiacilo y nitrato de peroxibenzoílo), los cuales junto a los NO_x , al ozono y a otros contaminantes secundarios; van a producir el llamado “*smog fotoquímico*” o “*niebla fotoquímica*”.¹⁴

La **química nocturna** se inicia por la presencia de un agente oxidante como el ozono, capaz de oxidar en un primer paso al dióxido de nitrógeno hasta trióxido. La reacción transcurre a través de la formación de diferentes óxidos de nitrógeno, lo que únicamente es posible en ausencia de radiación solar, pues el trióxido de nitrógeno sufre con facilidad reacciones fotolíticas, por lo que su concentración, para participar en este ciclo de reacciones, sólo es apreciable durante la noche.



La consecuencia final de estas oxidaciones es la formación de ácido nítrico, presente en las neblinas ácidas de las primeras horas del día, el cual posteriormente sufre una deposición en forma de lluvia ácida o de nitratos, originados por reacciones con partículas de metales o amoníaco presentes en la atmósfera.



También en el caso de los óxidos de nitrógeno el suelo puede actuar como sumidero de los mismos, los cuales se depositan en forma de sales; la tasa de absorción de este proceso va a depender de la naturaleza del suelo.^{6,14}

4.2.5.- Toxicodinámica del dióxido de nitrógeno

El dióxido de nitrógeno puede convertirse en el aire en ácido nítrico, lo que provoca que el agua que cae de las nubes se vuelva tóxica, un fenómeno conocido comúnmente como *lluvia ácida* y que provoca graves daños en la naturaleza y en los edificios. Asimismo, los óxidos de nitrógeno pueden reaccionar con compuestos orgánicos volátiles y producir el denominado ozono terrestre o troposférico, por situarse en esta capa más baja de la atmósfera. Mientras que la capa de ozono situada en las zonas altas de la atmósfera nos protege de los letales rayos ultravioleta, el ozono troposférico es un peligroso agente tóxico que destruye vegetales, irrita vías respiratorias y se convierte en un gas de efecto invernadero.

Los efectos adversos en el suelo son el resultado de su acidificación, la cual provoca una reubicación y migración de los nutrientes según los distintos tipos de suelo sometiendo a los árboles a unas condiciones de vida muy difíciles.

Los árboles necesitan un suelo sano para poder vivir. Pero la lluvia ácida daña el suelo, ya que altera las distintas sustancias que lo componen y modifica el delicado equilibrio vegetal. Los árboles que crecen sobre suelo ácido pierden fuerza para resistir adversidades como las heladas o la sequía. Cuando los árboles se debilitan por estos motivos, están más expuestos a los ataques de virus, hongos e insectos causantes de plagas forestales.

Los principales problemas medioambientales asociados a la contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos son: acidificación de ríos y lagos con baja o reducida alcalinidad; eutrofización de las aguas dulces y marinas (con el problema adicional de las algas tóxicas); y toxicidad directa de los compuestos nitrogenados para los animales acuáticos.²³

4.2.6.- Estándares de calidad ambiental (ECA)

Los estándares de calidad ambiental (ECA) para el aire son niveles de concentración máxima establecidos a nivel mundial por la OMS y en los países

por cada gobierno; así en nuestro país son establecidos por el Ministerio de Salud (MINSA), A través de la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA). Estos parámetros buscan regular el nivel de los contaminantes del aire y son establecidos como parte de su política de salud y medio ambiente de dichos organismos.

En el estudio realizado hemos considerado analizar los resultados de la concentración de ambos contaminantes con los estándares de calidad ambiental establecidos por la OMS y también con los establecidos por la DIGESA.

Se debe indicar que los ECA establecidos por la OMS han sido actualizados al año 2005, como consecuencia del análisis, por parte de este organismo, de estudios realizados a nivel mundial sobre los efectos de la contaminación del aire sobre la salud pública. Pero así mismo, debemos mencionar que estos estándares de calidad ambiental son establecidos en forma de guías de calidad del aire de la OMS, los cuales tienen por objeto ofrecer orientación sobre la manera de reducir los efectos de la contaminación del aire en la salud, de tal forma que la OMS recomienda, a los países donde los índices de contaminación están por encima de estos límites, puedan calcular la distancia que los separa de esos objetivos.

Mientras que para los ECA establecidos por la DIGESA, para el caso del dióxido de nitrógeno, aún no han sido actualizados y se viene trabajando con lo establecido en el año 2001, tal como se muestra en el cuadro 5.

El estándar actual de la OMS para el caso del dióxido de nitrógeno, como se muestra en el cuadro 4, es de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el cual se estableció para proteger al público de los efectos del NO_2 gaseoso en la salud. El fundamento de esto es que, debido a que la mayoría de los métodos de reducción de la concentración son específicos para los NO_x , no están concebidos para controlar otros contaminantes que los acompañan, pudiendo incluso aumentar sus emisiones. Sin embargo, si se vigila el NO_2 como marcador de mezclas complejas de la

contaminación derivada de la combustión se debería utilizar un valor guía anual más bajo. ¹

Cuadro 4. Valor guía actual de la OMS.

CONTAMINANTE	PERÍODO	VALOR ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	FORMATO
Dióxido de nitrógeno	Anual	40	Media Aritmética Anual
	1 hora	200	Media Aritmética de 1 hora

OMS, 2005. ¹

Cuadro 5. Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire - DIGESA

CONTAMINANTE	PERÍODO	VALOR ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	FORMATO
Dióxido de nitrógeno	Anual	100	Media Aritmética Anual
	1 hora	200	Media Aritmética de 1 hora

D.S.Nº 074 – 2001 – PCM. ¹⁹

4.2.7.- Métodos de Análisis del dióxido de nitrógeno

MÉTODO AUTOMÁTICO

El método de monitoreo empleado en este equipo, es el de quimioluminiscencia en fase gaseosa (NO , NO_2 , NO_x). Las concentraciones se expresan en partes por billón (ppb). ¹³

MÉTODO DE REFERENCIA de la EPA

Método del Arsenito de Sodio. El análisis se efectúa por Colorimetría, los resultados son expresados en microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).¹³

MÉTODO COLORIMÉTRICO DE Griess Saltzman

O Espectrofotométrico, los resultados son expresados en microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).¹⁶

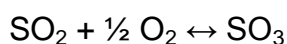
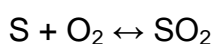
4.3.- Dióxido de azufre (SO₂)

4.3.1.- Propiedades fisicoquímicas

El anhídrido sulfuroso es un gas incoloro, muy soluble en agua y en otros compuestos: alcoholes metílico y etílico, ácido acético, éter y cloroformo, ácido sulfúrico, etc. La solubilidad del anhídrido sulfuroso disminuye con el aumento de temperatura. Punto de fusión, -75 °C, y punto de ebullición -10 °C. No es explosivo ni inflamable. En seco y a temperaturas ordinarias, es poco reactivo y muy estable. En presencia de humedad, se oxida fácilmente, formando primero ácido sulfuroso que luego se transforma lentamente en ácido sulfúrico. Es corrosivo frente a metales alcalinos en polvo (sodio, potasio, etc.) y el zinc.²⁵

El dióxido de azufre en concentraciones superiores a 10000 micrones/m³, aproximadamente 3 ppm, tiene un olor cáustico irritante. Se disuelve con facilidad en el agua para formar ácido sulfuroso, y en solución de éste se oxida lentamente y forma ácido sulfúrico con el oxígeno del aire. Este mecanismo es responsable de que el ácido suspendido sea arrastrado por las lluvias, formando lluvia ácida.²⁶

La combustión de cualquier sustancia que contenga azufre producirá SO₂ y SO₃, la cantidad de dióxido de azufre formada será siempre muy superior a la del trióxido, independientemente de la cantidad de oxígeno presente. Así veremos:



A temperaturas elevadas el trióxido de azufre es inestable, lo que se traduce en que el equilibrio, en el caso de la segunda reacción esté muy desplazado hacia el dióxido de azufre y el oxígeno en dichas condiciones. Este desplazamiento hace mucho más notorio, incluso a temperaturas bajas, si en el medio existe algún metal (catalizador).

4.3.2.- Fuentes de emisión

NATURALES

Se incluyen las emisiones volcánicas, las espumas marinas, los polvos terrestres, las emisiones de los terrenos biogénicos. Cerca del 90% del azufre que llega por estos conductos lo hace en forma de SO_2 pero también se emite azufre en formas reducidas inorgánicas, como H_2S , y orgánicas, como sulfuro de dimetilo y mercaptanos, especies que se oxidan en la atmósfera hasta SO_2 . Los óxidos de azufre también son producidos en algunos procesos biológicos, en los que las bacterias, en su proceso de respiración anaerobia generan H_2S (clásico olor a huevo podrido) y otros compuestos orgánicos como el disulfuro de carbono (CS_2), el sulfuro de carbonilo (COS), entre otros. Los océanos son fuente emisoras de azufre por acción del fitoplancton (algas marinas) produciendo moléculas de disulfuro de metilo ($(\text{CH}_3)_2\text{S}_2$).

ANTROPOGÉNICAS

La mayor fuente antropogénica es la derivada de la combustión de combustibles fósiles, ya que el azufre es un elemento común en los combustibles fósiles (carbón, petróleo), pues ambos proceden de seres vivos y en su material proteínico entra el azufre, el cual sobrevive a la fosilización y aparece en el combustible ya como azufre elemental, ya formando otros compuestos.²⁷

Las emisiones antropogénicas se pueden agrupar en fuentes móviles o fijas. Dentro de las primeras se encuentra el transporte público y privado ya sea de carga o de pasajeros y, en las segundas, se encuentran las calderas, hornos, centrales termoeléctricas, fundiciones de metales, etc, a excepción de las centrales termoeléctricas y las fundiciones, las fuentes mencionadas están vinculadas a los centros urbanos y, en general, las emisiones de azufre serán mayores mientras más grande y más desarrollada sea la ciudad.

4.3.3.- Efectos sobre la salud

LA INTOXICACIÓN AGUDA

Se produce como consecuencia de la inhalación de grandes concentraciones de anhídrido sulfuroso. Muy irritante de los ojos, nariz, garganta, piel y vías respiratorias, produce disnea, afonía, sofocación por espasmo laríngeo reflejo, alteración de la conciencia (confusión mental), náuseas, vómitos y astenia. La muerte instantánea es excepcional, pero puede desencadenar edema agudo de pulmón, shock y parálisis del centro respiratorio. ⁶

LA INTOXICACIÓN CRÓNICA

Aparece en aquellos trabajadores que han estado expuestos durante mucho tiempo al anhídrido sulfuroso. Principalmente se observa la afectación de los ojos y de la piel, y de las vías respiratorias y digestivas. En los ojos se manifiestan con lagrimeo, conjuntivitis y quemaduras oculares. En las vías respiratorias se observa irritación de la nariz (sequedad y dolor nasal, a veces con hemorragias), irritación de garganta (sequedad, quemazón y dolor), tos seca o productiva. ⁶

A continuación en el cuadro 6 se resume la toxicidad del SO₂ en seres humanos:

Cuadro 6. Toxicidad del dióxido de azufre en seres humanos

CONCENTRACIÓN ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	EFFECTO OBSERVADO
400 – 900	Posible incremento de los trastornos respiratorios (tos, irritación de la garganta y silbidos en el pecho) en personas con asma.
500 – 1700	Incremento de los trastornos respiratorios en personas con asma y posible agravamiento de las personas con enfermedades pulmonares cardíacas.
1700 – 2300	Incremento significativo de los trastornos respiratorios en personas con asma y agravamiento de las personas con enfermedades pulmonares y cardíacas.
2300 – 2900	Trastornos respiratorios severos en personas con asma y riesgo serio de agravamiento de las personas con enfermedades pulmonares cardíacas.
> 2900	Cambios en la función pulmonar y trastornos respiratorios en individuos sanos.

Orosco, 2003⁶

4.3.4.- Toxicocinética del dióxido de azufre

El azufre circula a través de la biosfera de la siguiente manera, por una parte se comprende el paso desde el suelo o bien desde el agua, si hablamos de un sistema acuático, a las plantas, a los animales y regresa nuevamente al suelo o al agua. Algunos de los compuestos sulfúricos presentes en la tierra son llevados al mar por los ríos. Este azufre es devuelto a la tierra por un mecanismo que consiste en convertirlo en compuestos gaseosos tales como el ácido sulfhídrico (H_2S) y el dióxido de azufre (SO_2). Estos penetran en la atmósfera y vuelven a tierra firme. Generalmente son lavados por las lluvias, aunque parte del dióxido de azufre puede ser directamente absorbido por las plantas desde la atmósfera.

Las bacterias desempeñan un papel crucial en el reciclaje del azufre. Cuando están presentes en el aire, la descomposición de los compuestos del azufre produce sulfato (SO_4^{2-}). Bajo condiciones anaeróbicas, el ácido sulfúrico y el sulfuro de dimetilo (CH_3SCH_3) son los productos principales. Cuando estos últimos gases llegan a la atmósfera, son oxidados y se convierten en dióxido de azufre. La oxidación posterior del dióxido de azufre y su disolución en el agua de lluvia produce ácido sulfhídrico y sulfatos, formas principalmente bajo las cuales regresa el azufre a los ecosistemas terrestres. El carbón mineral y el petróleo contienen también azufre y su combustión libera dióxido de azufre a la atmósfera.^{28, 29}

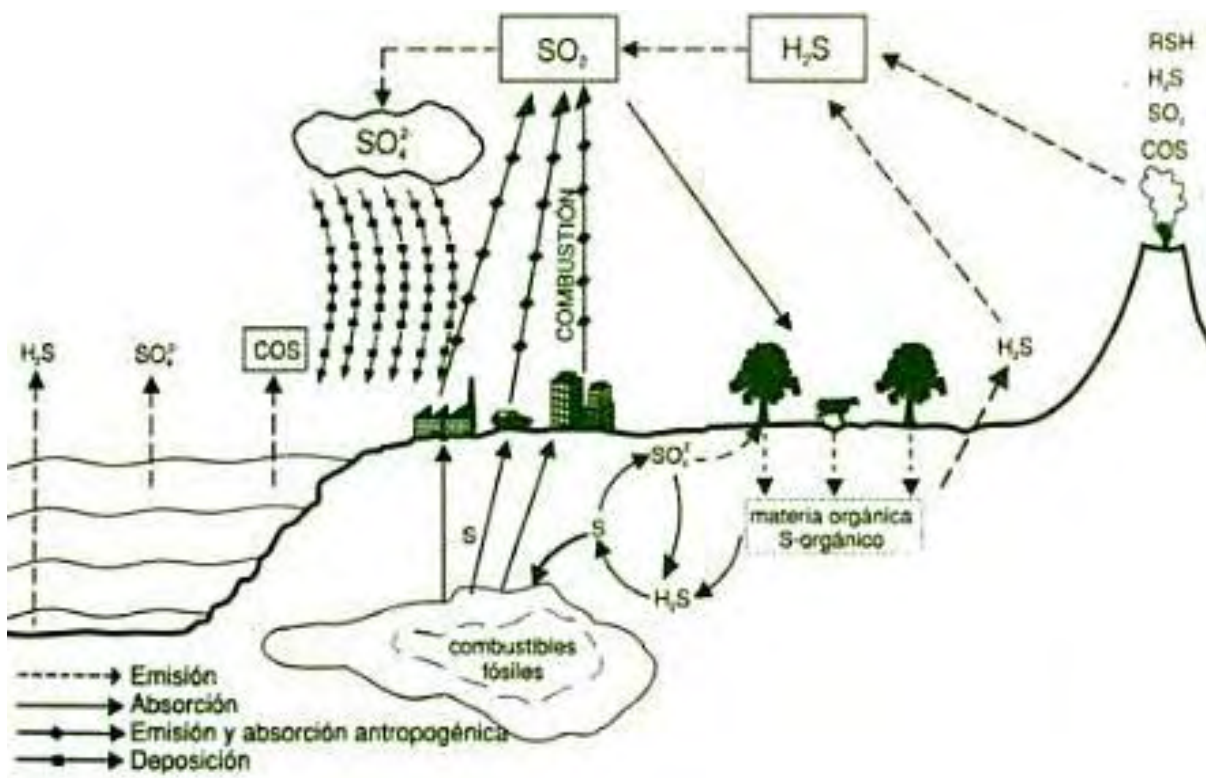


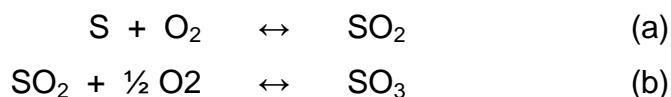
Gráfico 5. Ciclo del azufre en la naturaleza.

Martínez, 2006.²⁸

FORMACION DEL DIÓXIDO DE AZUFRE

La combustión de cualquier sustancia que contenga azufre producirá SO_2 y SO_3 . La cantidad de dióxido de azufre formada será siempre muy superior a la

del trióxido, independientemente de la cantidad de oxígeno presente. Se podría escribir un mecanismo simplificado de formación de ambos óxidos:



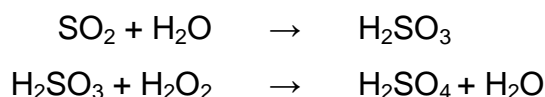
A temperaturas elevadas el trióxido de azufre es inestable, lo que se traduce en que el equilibrio, en el caso de la segunda reacción, este muy desplazado hacia el dióxido de azufre y el oxígeno en dichas condiciones. Este desplazamiento se hace mucho más notorio, incluso a bajas temperaturas si en el medio existe algún metal que actuará como catalizador.

EVOLUCION EN LA ATMÓSFERA

El SO₂ emitido a la atmósfera sufre en pocas horas una oxidación paulatina a SO₃ a través de procesos catalíticos o fotoquímicos. Sea uno u otro el mecanismo de oxidación el resultado final es la aparición de ácido sulfúrico debido a la reacción del SO₃ con el vapor de agua. Dichos procesos se pueden resumir de la siguiente manera:

Oxidación heterogénea del SO₂

Pueden ocurrir en fase acuosa en la superficie de las gotas de agua debido a la alta solubilidad del SO₂, o bien en la superficie de las partículas. En estos procesos de oxidación pueden actuar como agentes oxidantes el oxígeno, el ozono o el peróxido de hidrógeno.



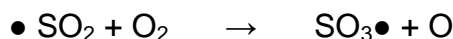
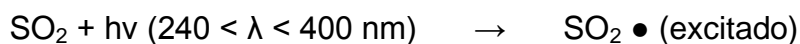
Oxidación homogénea del SO₂

Podemos distinguir entre los que se producen por fotooxidación directa del SO₂. Previa excitación de sus moléculas, y los que tienen lugar por acción de especies tales como el radical hidroxilo.

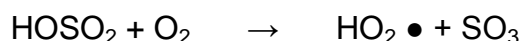
Una posibilidad de fotooxidación de SO₂ sería a través de un estado electrónicamente excitado, producido por absorción de radiación solar. El espectro de absorción del SO₂ muestra dos bandas a las longitudes de onda de la radiación solar troposférica, un débil, con un máximo de 388 nm, que

conduce a un estado tripleta ($^3\text{SO}_2$), y otra fuente, con un máximo de 294 nm, que lleva a un estado singulete ($^1\text{SO}_2$).⁸

- Fotooxidación directa:



- Acción de especies oxidantes:



4.3.5.- Toxicodinámica del dióxido del azufre

Los principales efectos de los óxidos de azufre serán los derivados de su transformación en agentes causantes de la lluvia ácida, sin embargo los óxidos de azufre como tales pueden también ocasionar problemas sobre los ecosistemas. Así podemos afirmar que en exposiciones de periodos cortos y elevadas concentraciones pueden originar en las plantas, áreas muertas en las hojas. Igualmente, aunque las concentraciones no sean elevadas, si el periodo de exposición es largo pueden originarse lesiones crónicas. Los daños dependen de la especie que se trate e incluso de otras condiciones ambientales.³⁰

La lluvia ácida tiene una gran cantidad de efectos nocivos en los ecosistemas y sobre los materiales. Al aumentar la acidez de las aguas de ríos y lagos, produce trastornos importantes en la vida acuática. Algunas especies de plantas y animales logran adaptarse a las nuevas condiciones para sobrevivir en la acidez del agua, pero otras no. Una mayor acidez en el agua puede causar deformaciones en los peces jóvenes y puede evitar la eclosión de las huevas.

La lluvia ácida también aumenta la acidez de los suelos, y esto origina cambios en la composición de los mismos, produciéndose la lixiviación de importantes nutrientes para las plantas (como el calcio) e infiltrando metales tóxicos, tales

como el cadmio, níquel, manganeso, plomo, mercurio, que de esta forma se introducen también en las corrientes de agua.

La lluvia ácida por su carácter corrosivo, corroe las construcciones y las infraestructuras.

4.3.6.- Estándares de Calidad Ambiental (ECAs)

Las guías para la calidad del aire tienen varios objetivos, incluida la protección de la salud pública contra los efectos adversos de los contaminantes, la eliminación o minimización de las concentraciones de contaminantes en el aire, la diseminación de información para tomar decisiones sobre el manejo de riesgos, a fin de orientar a los gobiernos en el establecimiento de estándares y elaboración de planes de acción locales, regionales y nacionales.¹

En el 2005 la OMS actualizó los ECAs en las Guías de Calidad del Aire relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre, como podemos observar en el cuadro 7. Así tenemos:

La revisión de la directriz referente a la concentración de SO₂ en 24 horas, que ha descendido de 125 a 20 µg/m³, se basa en las siguientes consideraciones:

- Los efectos nocivos sobre la salud están asociados a niveles de SO₂ muy inferiores a los aceptados hasta ahora.
- Se requiere mayor grado de protección.
- Pese a las dudas que plantea todavía la causalidad de los efectos de bajas concentraciones de SO₂, es probable que la reducción de las concentraciones disminuya la exposición a otros contaminantes.

Cuadro 7. Valor guía actual de la OMS (Actualizado al 2005).

CONTAMINANTE	PERIODO	VALOR (µg/m ³)	FORMATO
Dióxido de azufre	24 horas	20	Media Aritmética de 24 horas
	10 minutos	500	Media Aritmética de 10 minutos

OMS, 2005.¹

En el Perú por Decreto supremo N° 074 – 2001 – PCM se establecieron los Estándares de Calidad Ambiental, así tenemos los valores para el dióxido de azufre, como se indica en el cuadro 8. ¹⁹

Cuadro 8. Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire – DIGESA.

CONTAMINANTE	PERIODO	VALOR ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	FORMATO
Dióxido de azufre	Anual	80	Media Aritmética Anual
	24 horas	365	No exceder más de una vez al año

D.S.N° 074 – 2001 – PCM. ¹⁹

El 30 de setiembre del 2009 se modifica el estándar de calidad ambiental para el dióxido de azufre (ver cuadro 9) mediante el D.S.N° 003 – 2008. ¹⁸

Cuadro 9. Estándar de calidad ambiental para el dióxido de azufre: SO₂.

PARÁMETRO	PERÍODO	VALOR $\mu\text{g}/\text{m}^3$	VIGENCIA	FORMATO	MÉTODO DE ANÁLISIS
Dióxido de azufre (SO ₂)	24 horas	80	1 de enero de 2009	Media aritmética	Fluorescencia UV (método automático)
	24 horas	20	1 de enero del 2014		

D.S.N° 003 – 2008 – MINAM. ¹⁸

4.3.7.- Métodos de Análisis del dióxido de azufre

DETERMINACIÓN DEL SO₂ A PARTIR DE FUENTES FIJAS, PROCEDIMIENTO DEL ANALIZADOR INSTRUMENTAL)

Este método es aplicable para la medición, puntual, continua o en línea, de las emisiones de SO₂.

FLUORESCENCIA ULTRAVIOLETA

Se ilumina la muestra con luz ultravioleta (214 nm) y las moléculas de SO₂ emiten luz de fluorescencia en el visible (350 nm).

MÉTODO COLORIMÉTRICO DE West Gaeke o Espectrofotométrico

Los resultados son expresados en microgramos por metro cúbico (µg/m³).²⁴

4.4.- Estudios sobre Contaminación por Dióxido de Nitrógeno y Dióxido de Azufre

En las últimas tres décadas, en América Latina, se han realizado más estudios sobre calidad del aire que en el todo el siglo anterior, estos estudios han sido la base científica que han permitido la adopción de políticas en mejora del medio atmosférico en ciudades como Sao Paulo, Santiago de Chile, Buenos Aires, Ciudad de México y otros.

En 1997, en Santiago, se planteó el “Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana”; el cual proponía que para el año 2003, en Santiago se comercialice sólo gasolina libre de plomo, que el 80% de los vehículos sean catalíticos, con emisiones mucho menores que los vehículos convencionales, y que en julio del 2004, Santiago tenga el diesel más limpio de Latinoamérica (50 ppm de azufre). Es así que desde el año 1998 las concentraciones de dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre han estado siempre por debajo del 50% del valor de la norma nacional. Así, para el dióxido de nitrógeno, la concentración promedio de estudio entre 1998 y el 2004 fue de 39,29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Mientras que para el dióxido de azufre, el mismo promedio entre 1997 y el 2004 fue de 12,38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.³²

En Ciudad de México, para el dióxido de azufre, durante 2008 no se reportaron valores por arriba de los límites de la Norma Oficial Mexicana (NOM) en ninguna de las estaciones de monitoreo que miden este parámetro. La concentración promedio de 24 horas fue menor a 0,130 ppm (establecido en la NOM) en todas las estaciones de monitoreo. El promedio anual máximo se registró en la estación Tlalnepantla con 0,010 ppm, en el noroeste de la zona metropolitana, sin embargo este no rebasó el límite para el promedio anual de la NOM de 0,030 ppm. Mientras que para el dióxido de nitrógeno, de acuerdo con el inventario de emisiones, en la zona metropolitana de Ciudad de México los vehículos son la principal fuente de óxidos de nitrógeno y contribuyen con el 82% de las emisiones totales; pues a pesar de la intensa actividad fotoquímica en la atmósfera de la Ciudad de México, durante 2008 la concentración

promedio horaria no rebasó el valor establecido por la NOM para este contaminante (0,210 ppm). La concentración más alta se registró en la estación Tacuba, con 0,183 ppm, seguida de Merced con 0,174 ppm y Azcapotzalco con 0,170 ppm.³³

En el Perú, según un estudio realizado por la DIGESA entre los años 1996 y 2000, donde se calcularon los promedios anuales de dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno; los resultados indican que todos los promedios anuales del primero obtenidos durante dichos años, superaron el lineamiento anual de la OMS de 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Asimismo, el promedio anual de las concentraciones de dióxido de nitrógeno obtenidos desde 1996 a 1999, superaron el lineamiento anual de la OMS 1987 de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.³⁴

En 1992 se realizó el estudio “Cuantificación espectrofotométrica de dióxido de nitrógeno en Lima Metropolitana” de la Facultad de Farmacia y Bioquímica de la UNMSM, en la que se obtiene una concentración promedio de 68,249 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de dióxido de nitrógeno; este valor se encuentra por debajo del estándar de calidad ambiental establecido por DIGESA para este contaminante, el cual es 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.³⁵

En 1994 se desarrolló, en la UNMSM, la tesis “Distribución Espacial y Estacional del Dióxido de Azufre en Lima Metropolitana”; donde se establecen 19 puntos de muestreo representativos, de acuerdo a la carga vehicular de la zona. El método usado fue el de West Gaeke y el mismo sistema de toma de muestra del presente estudio. Los resultados obtenidos demuestran que la concentración de dióxido de azufre es mayor en la estación de invierno que en la primavera, y el promedio general (0,0705 ppm) excede el patrón nacional de calidad del aire de 0,06 ppm, establecido por la autoridad nacional.³⁶

En el año 2007, la Municipalidad Distrital de Miraflores a través de la empresa Klepel Consulting S.A.C.; realizó la medición, en tres lugares representativos y durante 14 días, de los PM10 y del dióxido de nitrógeno; utilizando para este último análisis los muestreadores de difusión pasiva. El valor promedio

obtenido de dióxido de nitrógeno en el Óvalo de Miraflores fue $78,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el cual fue catalogado como extremadamente alto; mientras que en la Av. Benavides el valor obtenido, para el mismo contaminante, fue de $34,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el cual está dentro de lo esperado para una avenida de alto tránsito vehicular. Por otro lado, el resultado en el estadio de Miraflores da un valor bajo ($17,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$), mas en línea a lo esperado para un punto ubicado cerca del mar. Los resultados en su conjunto demuestran, que la contaminación por PM10 y NO₂ se encuentran en un nivel preocupante y merecen, un estudio más profundo, de preferencia durante un año completo y en diversos puntos del distrito, lo cual permitiría tener datos más confiables y directamente comparables con los ECAs ya establecidos.³⁷

PARTE EXPERIMENTAL

V.- EQUIPOS Y MATERIALES

El presente trabajo se realizó en los ambientes del Laboratorio del Centro de Información, Control Toxicológico y Apoyo a la Gestión Ambiental (CICOTOX), se utilizaron los siguientes equipos y materiales:

5.1.- Equipos

- Espectrofotómetro VISION lite Helios Zeta.
- Captador de aire: orificio regulador de caudal de aire marca Millipore de 3,0 L/min.
- Bomba de vacío marca Millipore, modelo XX60 000 000
- Vacuómetro marca Asta, modelo M5HFIA.
- Cronómetro.
- Destilador.
- Ultrasonido de metal, marca Ultrasons – H / Selecta.
- Desecador de vidrio.
- Estufa.
- Balanza analítica, marca OHAUS, modelo AP210S, serie M37607.

5.2.- Materiales

- Tubo de absorción: de vidrio marca Kimax de 100 mL de volumen.
- Mangueras conectoras y llaves de paso.
- Fiolas de 25, 50, 100, 500 y 1000 mL.
- Pipetas volumétricas de 1 y 10 mL.
- Micropipetas.
- Probetas de 10, 50 y 100 mL.
- Tubos de ensayo.
- Gradillas.
- Picetas.
- Soporte Universal.

VI.- TOMA DE MUESTRA

Las muestras de aire, para ambos contaminantes, se tomaron utilizando un equipo que consta de un medidor de caudal de aire, un manómetro debidamente calibrado y un tubo burbujeador, donde va incorporado la solución de captación respectiva (Ver Anexo N° 5).

La presión utilizada para absorber la muestra de aire fue de 300 mmHg con el cual se obtuvo una adecuada área de contacto entre las burbujas formadas y la solución de captación.

La toma de muestra se llevó a cabo considerando la altura del suelo al equipo (aproximadamente un metro), la ubicación de las fuentes del contaminante, la dirección del viento y las precipitaciones. El muestreo se llevó a cabo en forma discontinua, tomando las muestras de aire en dos turnos: entre las 12:00 y 14:00 horas y entre las 18:00 y 20:00 horas; considerando la diferencia de temperatura entre ambos turnos, las horas puntas de tráfico vehicular y de transeúntes y la influencia de otros factores meteorológicos.

6.1.- Estaciones de muestreo

Se consideraron cinco estaciones de muestreo, distribuidos en Lima Metropolitana; en lugares representativos y adecuados para la toma de muestra, considerando el flujo de aire, la acumulación del contaminante, facilidad de trabajo, tráfico vehicular y de transeúntes.

Las estaciones de muestreo se describen en el siguiente cuadro:

Cuadro 10. Estaciones de muestreo

NÚMERO	LUGAR	DISTRITO
Estación 1	Plaza Dos de Mayo	Cercado de Lima
Estación 2	Plaza Grau	Cercado de Lima
Estación 3	Plaza Bolognesi	Cercado de Lima
Estación 4	Cruce Av. Abancay – Av. N. Piérola	Cercado de Lima
Estación 5	Cruce Jr. Huanta – Jr. Puno	Cercado de Lima

VII.- DIÓXIDO DE NITRÓGENO

7.1.- Método y fundamento

MÉTODO COLORIMÉTRICO DE **Griess Saltzman**, el cual se fundamenta en la reacción específica del NO_2 (Dióxido de Nitrógeno) con el ácido sulfanílico para formar un compuesto diazonio. Este compuesto reacciona con el N-(1-Naftil) etilenodiamina dihidrocloruro para formar un colorante azo de color rojizo (gráfico 6) cuya absorbancia a 550nm producida al permanecer en reposo durante 15 minutos se lee en el espectrofotómetro.²⁴

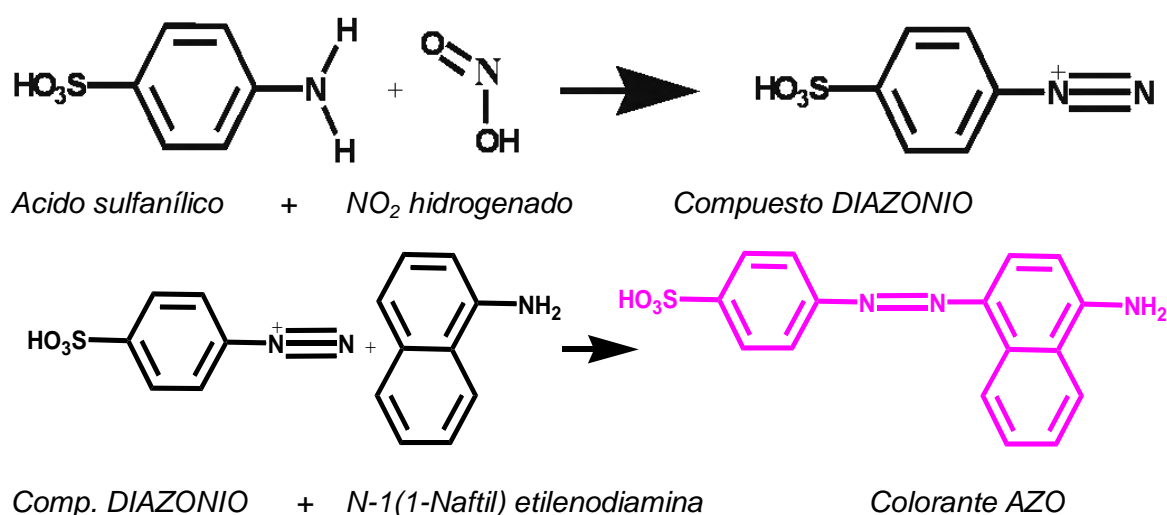


Gráfico 6. Reacciones químicas en la formación del colorante azo.

7.2.- Reactivos

- Agua desionizada (agua carente de nitritos)
- Disolución stock de N-(1-Naftil)-etilenodiamina dihidrocloruro al 0,1%. Se disuelve 0,1 g del reactivo en 100mL de agua carente de nitritos.
- Reactivo absorbente. Se añaden 5 g de ácido sulfanílico anhidro en 140 mL de ácido acético glacial. Se calienta ligeramente para disolver, se enfría, se añaden 20 mL de la disolución stock anterior y se diluye en 1 litro de agua carente de nitritos.
- Disolución patrón de nitrito sódico (0,0203 g/L). Se prepara justo antes de proceder a la calibración haciendo diluciones sucesivas de una disolución stock concentrada y guardada en la nevera que contiene 2,03 g del reactivo por litro.²⁴

7.3.- Técnica operatoria

Se coloca 10,0 mL de reactivo absorbente en el burbujeador de vidrio poroso; se enciende la bomba de vacío, se ajusta el flujo de la muestra a un valor de 3,0 L/min y se controla el muestreo por un tiempo de 15 minutos en el cual aparece el color rojizo comparable con los estándares de calibración. Se debe

anotar la temperatura y presión atmosférica para corregir luego el volumen de aire tomado. Se deja reposar 15 minutos a 20 – 25 °C y se mide la absorbancia frente a un blanco de reactivo absorbente a 550 nm. Si la absorbancia es mayor que 1,0 se pueden hacer diluciones a 25 mL con el reactivo absorbente como diluyente.²⁴

Las muestras se midieron dentro de la hora siguiente a los 15 minutos requeridos para el desarrollo del color.

7.4.- Curva de calibración

El método de Griess – Saltzman se calibró utilizando el método químico.

Se pipetea cantidades graduadas de la disolución patrón de nitrito sódico (0,0203 g/L) en matraces aforados de 25 mL y se llevan hasta el enrase con reactivo absorbente.

Se deja que desarrolle el color durante 15 minutos y se mide la absorbancia frente a un blanco de la disolución absorbente no expuesto a 550 nm.

Se calculan los microlitros de la solución patrón de nitrito que se van a utilizar para leer las absorbancias y su equivalencia en µL/mL de reactivo absorbente, según la relación:

$10 \mu\text{L NO}_2 = 10 \text{ ppm NO}_2/\text{litros de muestra de aire} = 1\text{mL de disolución patrón de NaNO}_2$ (a 760 mmHg y 25°C).

Estos datos se aprecian en el cuadro 11.

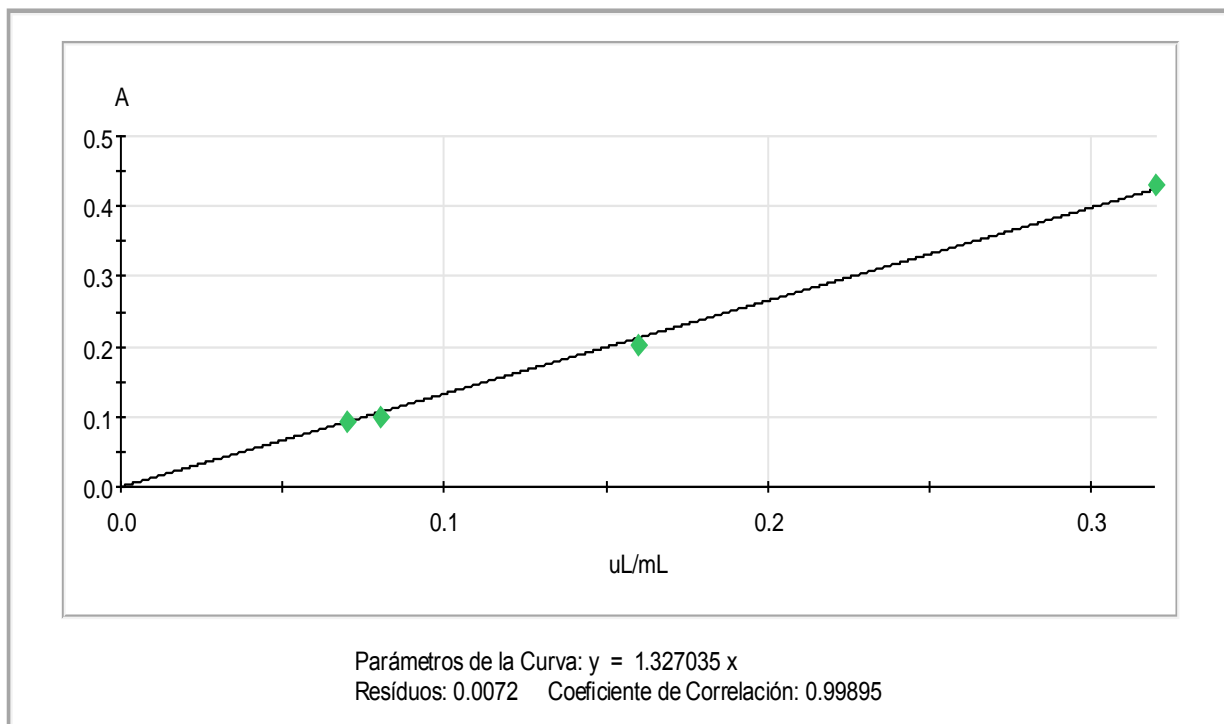
Cuadro 11. Absorbancias del estándar de nitrito, a diferentes concentraciones.

VOLUMEN DE LA SOLUCIÓN PATRÓN DE NITRITO(μL)	EQUIVALENCIA EN μL DE NITRITO POR mL DE REACTIVO ABSORBENTE (μL/mL)	ABSORBANCIA
175	0,07	0,088
200	0,08	0,105
400	0,16	0,200
800	0,32	0,434

La concentración de cada estándar (μ L/mL) se plotean contra las lecturas obtenidas para los mismos, buscando la línea más recta que proporcione el mejor ajuste de los puntos; de este modo se obtiene el valor de la pendiente (K) de la curva de calibración, que nos servirá para determinar la concentración de las muestras de aire. Cuando se utilicen celdas de 1,0 cm este valor debe ser 0,75 aproximadamente.²⁴

A continuación se describe la obtención de la curva de calibración del dióxido de nitrógeno en el espectrofotómetro:

Método : Nitrito CTX 10/2009.mqa (550 nm)
Última modificación : 27/10/2009 06:18:09 p.m. por Abel
Espectrofotómetro : VISION lite Helios Zeta
Número de serie : 164501



7.5.- Cálculo de las concentraciones

La concentración de NO_2 en las muestras de aire se determinó mediante la relación:

$$\text{NO}_2 \text{ (ppm)} = \frac{A \times K}{V}$$

Donde:

A = Absorbancia de la muestra

K = Pendiente de la curva de calibración, expresada en μL de NO_2 sobre unidades de absorbancia.

$$K = \frac{\mu\text{L (NaNO}_2\text{)}}{\text{Unidad de absorbancia}}$$

V = Volumen de la muestra en L/mL de reactivo absorbente.

Para expresar los valores de NO_2 en $\mu\text{g/m}^3$, se debe utilizar la siguiente conversión:

$$\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} = \frac{\text{ppm} \times \text{peso molecular} \times 1000}{24.5}$$

VIII.- DIÓXIDO DE AZUFRE

8.1.- Método y fundamento

MÉTODO MODIFICADO DE **West Gaeke**, el cual es selectivo y muy sensible para SO_2 ; se fundamenta en la absorción del dióxido de azufre mediante el paso del aire a través de una solución de tetracloromercurato potásico (TCM), resultando la formación de un complejo de diclorosulfitomercurato, el cual es estable y no volátil. Este ión sulfito reacciona con formaldehído y pararosanilina en disolución ácida para dar el ácido pararosanilina sulfónico que tiene color púrpura. La intensidad del color de este ácido leído en el espectrofotómetro a 548 nm es proporcional a la concentración del SO_2 absorbido para concentraciones entre 0,002 ppm y 5 ppm. ^{24, 31}

Las reacciones químicas (gráfico 7) que acurren en Método de West Gaeke:

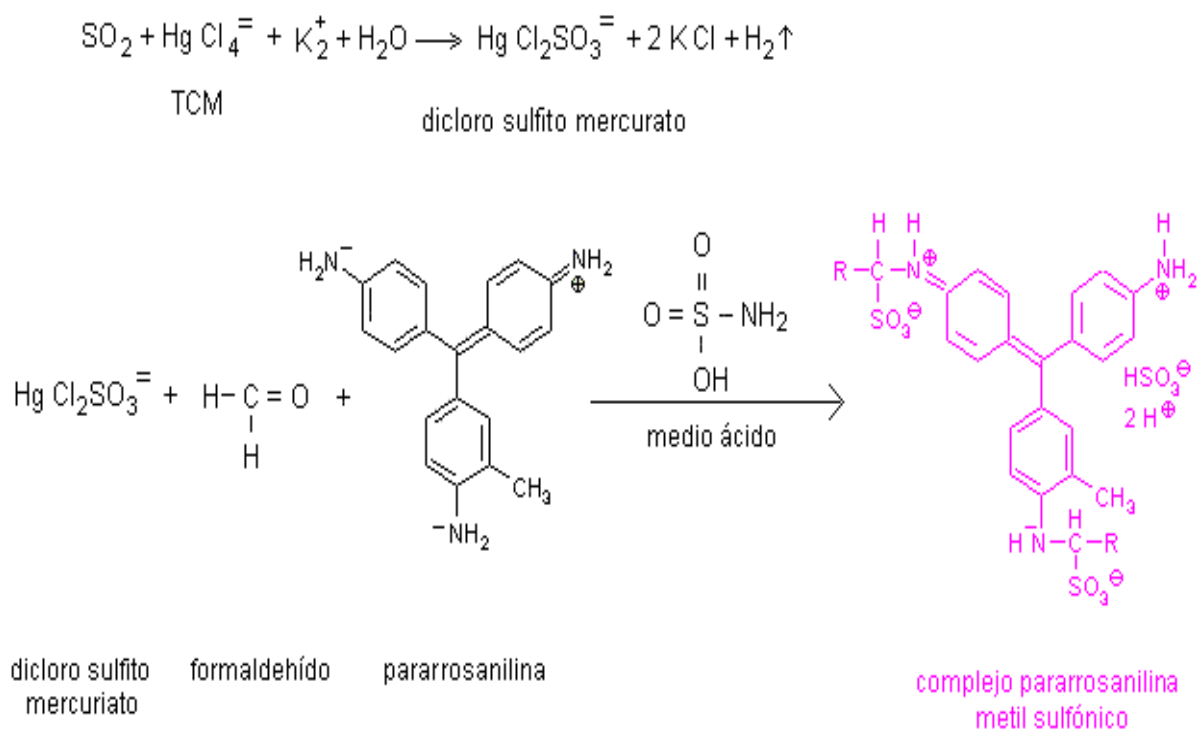


Gráfico 7. Reacciones químicas en la formación del complejo pararosanilina

8.2.- Reactivos

- Agua desionizada
- **Reactivo absorbente** (Tetracloromercurato potásico 0,04 M). Se prepara disolviendo 10,8 gramos de cloruro mercúrico junto con 5,96 gramos de cloruro potásico y 0,066 gramos de sal sódica de EDTA en agua destilada hasta un volumen total de 1 litro.
- **Disolución stock pararosanilina 0,2%**. Utilizando pararosanilina purificada al 99% disolver 200 mg del colorante en 100 mL de HCl 1N.
- **Reactivo de pararosanilina**. Utilizando un matraz aforado de 250 mL se diluyen 20 mL de la disolución stock con agua destilada hasta 250 mL.
- **Formaldehído al 0,2%**. Se diluye 0,5 mL de formaldehído al 40% en 1 litro de agua.
- **Disolución patrón de sulfito**. Se disuelve 0,400 gramos de sulfito sódico en 500 mL de agua libre de sulfitos. Esta disolución se debe calibrar añadiendo yodo en exceso y valorar por retroceso el exceso de yodo con disolución de tiosulfato 0,1 N calibrada con dicromato hasta punto final de almidón.
- **Solución diluida de sulfito**. Se pipetea 2,0 mL de disolución normalizada de sulfito en un matraz aforado de 100 mL y se lleva hasta aforo con agua libre de sulfitos.²⁴

8.3.- Técnica operatoria

Se agrega al borboteador 10 mL de solución absorbente TCM 0,04M, se conecta a una manguera conectora. Se enciende la bomba de vacío, se ajusta el flujo de aire a razón de 3,0 L/min y se controla el muestreo por un período de 15 minutos. El borboteador que contiene el reactivo absorbente se protege de la luz solar envolviéndolo con una hoja de aluminio. El contenido del borboteador se arrastra con agua desionizada (usando máximo 5 mL) hasta un matraz aforado de 25 mL; se añade 1mL de ácido sulfámico al 0,6% en disolución acuosa y se deja estar por lo menos durante 10 minutos. Luego se añade exactamente 2,0 mL de formaldehído al 0,2% y 5,0 mL de reactivo de pararosanilina. Diluir con agua desionizada capacidad suficiente para 25 mL.

Luego de 30 minutos se miden las absorbancias de las muestras y del blanco a 548 nm. Cuando la absorbancia sea mayor a 1,0 se diluye la muestra con una porción igual de blanco con el reactivo absorbente y se lee luego de dejar reposar de 3 a 5 minutos.²⁴

8.4.- Curva de calibración

El método modificado de West Gaeke se calibró utilizando el método químico. A partir de una solución de trabajo, en este caso la solución diluida de sulfito, el cual tiene una concentración de 6,4 ug/mL (luego de la titulación de la solución patrón de sulfito y de la posterior obtención de la solución diluida). Se pipetea alícuotas de esta solución en una serie de matraces de 25 mL y se diluye hasta cerca de 10 mL con TCM 0,04M. Después se añade 1,0mL de ácido sulfámico al 0,6% y se deja reaccionar durante 10 minutos al menos. Se añade 20mL de formaldehído al 0,2% y 5,0 mL de pararosanilina.

Diluir todas las muestras hasta el enrase con agua desionizada. Reposo por 30 minutos. Leer las absorbancias frente a un blanco.

Se calcula la concentración de cada estándar en µg/mL de solución de absorción. Los resultados se pueden observar en el cuadro 12.

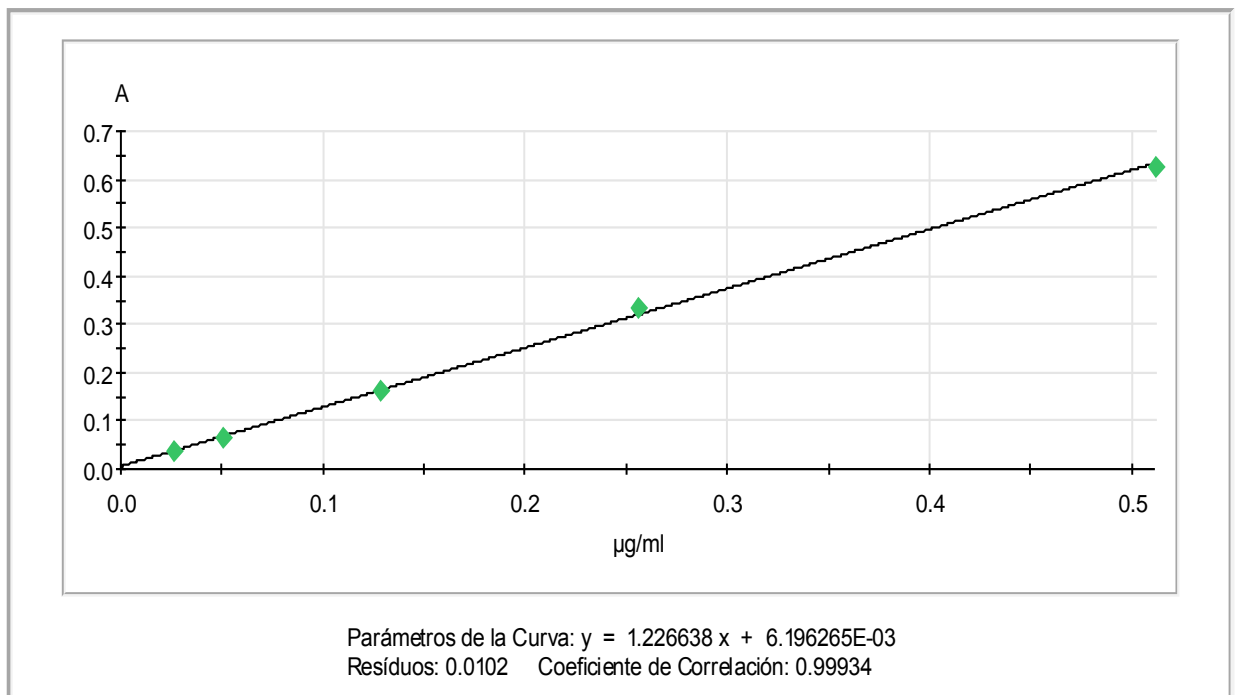
Cuadro 12. Absorbancias del estándar de *sulfito*, a diferentes concentraciones

Volumen de la solución diluida de sulfito (mL)	Equivalencia en µg de sulfito por mL de reactivo (µg/mL)	Absorbancias
100	0,026	0,035
200	0,052	0,065
490	0,128	0,162
980	0,256	0,336

La concentración de cada estándar (µg/mL) se plotean contra las lecturas obtenidas para los mismos, buscando la línea más recta que proporcione el mejor ajuste de los puntos; de este modo se obtiene el valor de la pendiente (K) de la curva de calibración, que nos servirá para determinar la concentración de las muestras de aire.²⁴

A continuación se describe la obtención de la curva de calibración del dióxido de azufre en el espectrofotómetro:

Método	Sulfito CTX 10/2009.mqa (548 nm)
Última modificación	29/10/2009 06:18:09 p.m. por Marina
Espectrofotómetro	VISIONlite Helios Zeta
Número de serie	164501



8.5.- Cálculo de las concentraciones

La concentración de SO₂ en las muestras de aire se determinó mediante la relación:

$$SO_2 \text{ (ppm)} = \frac{(A - A_0) \times 0,382 \text{ B}}{V}$$

Donde:

A = Absorbancia de la muestra

Ao = Absorbancia del blanco

B = Factor de calibración (inverso de la pendiente)

V = Volumen de la muestra en L/mL de reactivo absorbente

Para expresar los valores de dióxido de azufre en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ utilizamos la misma fórmula de conversión usada para el dióxido de nitrógeno.

IX.- RESULTADOS

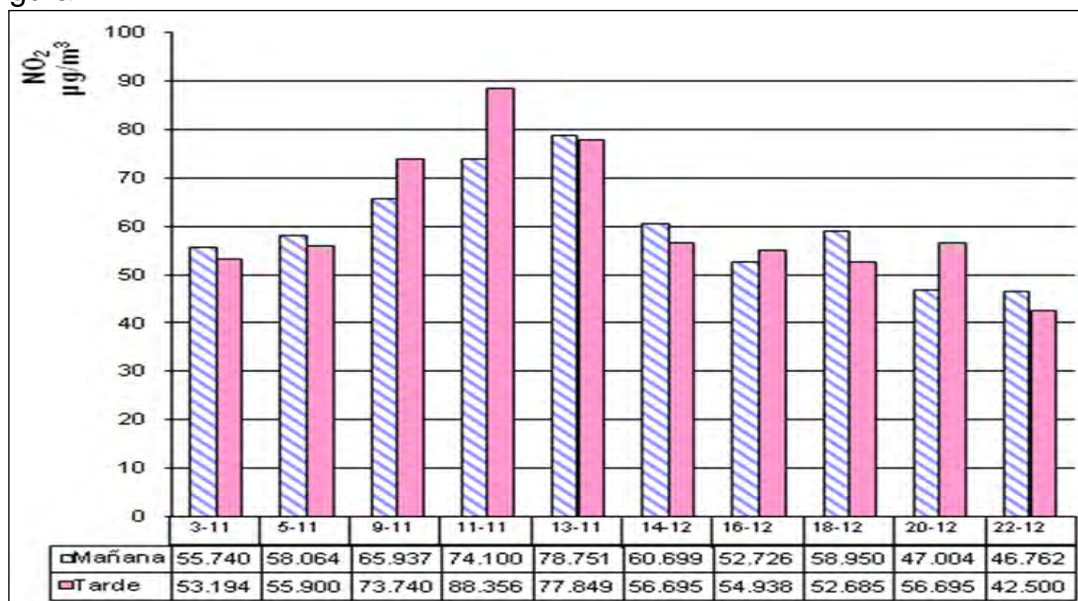
9.1.- Dióxido de Nitrógeno

Concentraciones de Dióxido de Nitrógeno – Estación 1

Tabla 1

DIA	HORA		LECTURAS		CONCENTRACIONES	
	Mañana	Tarde	A	%T	ppm	µg/m ³
03-Nov-09	12.00 hrs		0,142	72,111	0,030	55,740
05-Nov-09	12.05 hrs		0,158	69,502	0,031	58,064
09-Nov-09	12.02 hrs		0,175	66,834	0,035	65,937
11-Nov-09	12.00 hrs		0,194	63,973	0,039	74,100
13-Nov-09	12.07 hrs		0,215	60,954	0,042	78,751
14-Dic-09	12.00 hrs		0,170	67,608	0,032	60,699
16-Dic-09	12.08 hrs		0,155	69,984	0,028	52,726
18-Dic-09	12.05 hrs		0,185	65,313	0,031	58,950
20-Dic-09	12.00 hrs		0,144	71,779	0,025	47,004
22-Dic-09	12.03 hrs		0,132	73,79	0,025	46,762
03-Nov-09		18.00 hrs	0,129	74,302	0,028	53,194
05-Nov-09		18.05 hrs	0,138	72,778	0,030	55,900
09-Nov-09		18.10 hrs	0,180	66,069	0,039	73,740
11-Nov-09		18.00 hrs	0,207	62,087	0,047	88,356
13-Nov-09		18.02 hrs	0,191	64,417	0,041	77,849
14-Dic-09		18.00 hrs	0,148	71,121	0,030	56,695
16-Dic-09		18.12 hrs	0,149	70,958	0,029	54,938
18-Dic-09		18.05 hrs	0,152	70,469	0,028	52,685
20-Dic-09		18.00 hrs	0,158	69,502	0,030	56,695
22-Dic-09		18.07 hrs	0,118	76,208	0,023	42,500
PROMEDIOS:			0,162		0,032	60,564

Figura 1

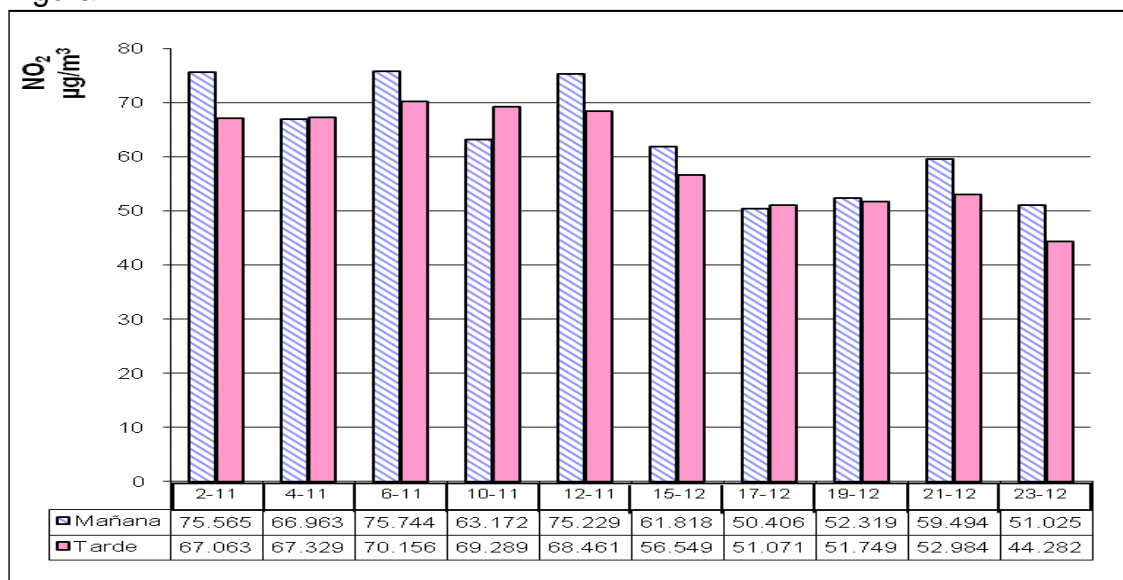


Concentraciones de Dióxido de Nitrógeno – Estación 2

Tabla 2

DIA	HORA		LECTURAS		CONCENTRACIONES	
	Mañana	Tarde	A	%T	ppm	µg/m ³
02-Nov-09	12.00 hrs		0,197	63,533	0,040	75,565
04-Nov-09	12.05 hrs		0,178	66,374	0,036	66,963
06-Nov-09	12.02 hrs		0,184	65,464	0,040	75,744
10-Nov-09	12.00 hrs		0,166	68,234	0,034	63,172
12-Nov-09	12.07 hrs		0,193	64,121	0,040	75,229
15-Dic-09	12.00 hrs		0,181	65,917	0,033	61,818
17-Dic-09	12.08 hrs		0,157	69,663	0,027	50,406
19-Dic-09	12.05 hrs		0,158	69,502	0,028	52,319
21-Dic-09	12.00 hrs		0,170	67,608	0,032	59,494
23-Dic-09	12.03 hrs		0,141	72,277	0,027	51,025
02-Nov-09		18.00 hrs	0,165	68,391	0,036	67,063
04-Nov-09		18.05 hrs	0,163	68,707	0,036	67,329
06-Nov-09		18.10 hrs	0,168	67,92	0,037	70,156
10-Nov-09		18.00 hrs	0,163	68,707	0,037	69,289
12-Nov-09		18.02 hrs	0,162	68,865	0,036	68,461
15-Dic-09		18.00 hrs	0,152	70,469	0,030	56,549
17-Dic-09		18.12 hrs	0,143	71,945	0,027	51,071
19-Dic-09		18.05 hrs	0,143	71,945	0,028	51,749
21-Dic-09		18.00 hrs	0,147	71,285	0,028	52,984
23-Dic-09		18.07 hrs	0,122	75,509	0,024	44,282
PROMEDIOS:			0,163		0,033	61,533

Figura 2

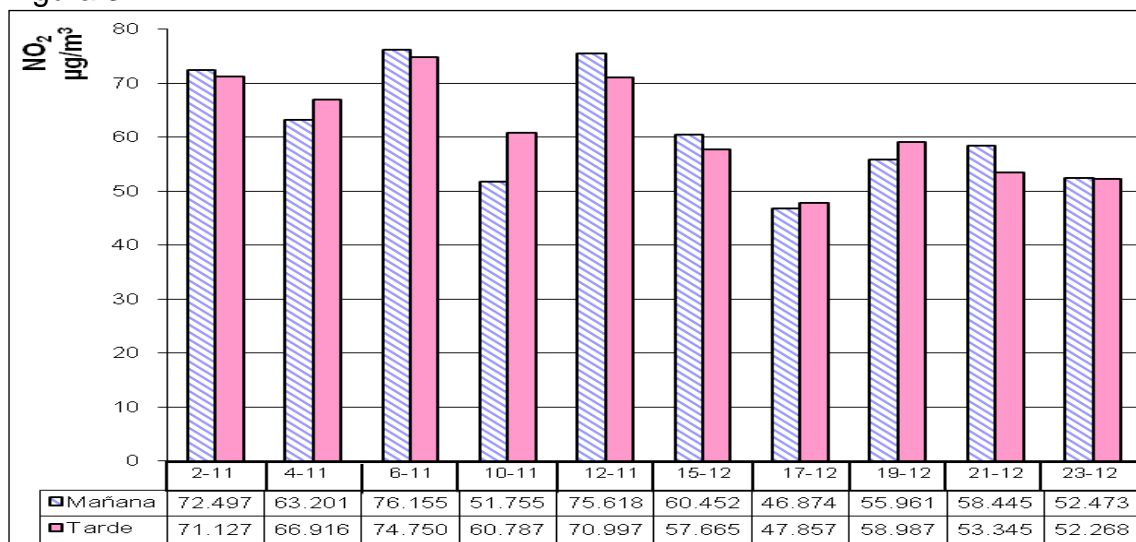


Concentraciones de Dióxido de Nitrógeno – Estación 3

Tabla 3

DIA	HORA		LECTURAS		CONCENTRACIONES	
	Mañana	Tarde	A	%T	ppm	µg/m ³
02-Nov-09	13.00 hrs		0,189	64,714	0,039	72,497
04-Nov-09	13.05 hrs		0,168	67,92	0,034	63,201
06-Nov-09	13.02 hrs		0,185	65,313	0,041	76,155
10-Nov-09	13.00 hrs		0,136	73,114	0,028	51,755
12-Nov-09	13.07 hrs		0,194	63,973	0,040	75,618
15-Dic-09	13.00 hrs		0,177	66,527	0,032	60,452
17-Dic-09	13.08 hrs		0,146	71,45	0,025	46,874
19-Dic-09	13.05 hrs		0,169	67,764	0,030	55,961
21-Dic-09	13.00 hrs		0,167	68,077	0,031	58,445
23-Dic-09	13.03 hrs		0,145	71,614	0,028	52,473
02-Nov-09		19.00 hrs	0,175	66,834	0,038	71,127
04-Nov-09		19.05 hrs	0,162	68,865	0,036	66,916
06-Nov-09		19.10 hrs	0,179	66,222	0,040	74,750
10-Nov-09		19.00 hrs	0,143	71,945	0,032	60,787
12-Nov-09		19.02 hrs	0,168	67,92	0,038	70,997
15-Dic-09		19.00 hrs	0,155	69,984	0,031	57,665
17-Dic-09		19.12 hrs	0,134	73,451	0,025	47,857
19-Dic-09		19.05 hrs	0,163	68,707	0,031	58,987
21-Dic-09		19.00 hrs	0,148	71,121	0,028	53,345
23-Dic-09		19.07 hrs	0,144	71,779	0,028	52,268
PROMEDIOS:			0,162		0,033	61,406

Figura 3

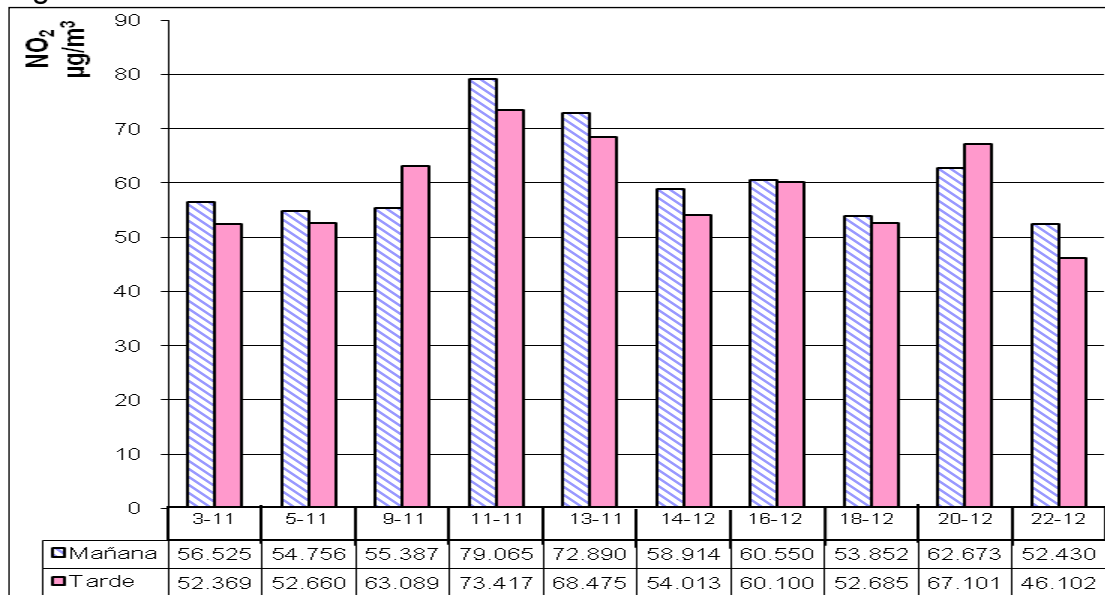


Concentraciones de Dióxido de Nitrógeno – Estación 4

Tabla 4

DIA	HORA		LECTURAS		CONCENTRACIONES	
	Mañana	Tarde	A	%T	ppm	µg/m ³
03-Nov-09	12.50 hrs		0,144	71,779	0,030	56,525
05-Nov-09	12.55 hrs		0,149	70,958	0,029	54,756
09-Nov-09	12.52 hrs		0,147	71,285	0,029	55,387
11-Nov-09	12.50 hrs		0,207	62,087	0,042	79,065
13-Nov-09	12.57 hrs		0,199	63,241	0,039	72,890
14-Dic-09	12.50 hrs		0,165	68,391	0,031	58,914
16-Dic-09	12.58 hrs		0,178	66,374	0,032	60,550
18-Dic-09	12.55 hrs		0,169	67,764	0,029	53,852
20-Dic-09	12.50 hrs		0,192	64,269	0,033	62,673
22-Dic-09	12.53 hrs		0,148	71,121	0,028	52,430
03-Nov-09		18.50 hrs	0,127	74,645	0,028	52,369
05-Nov-09		18.55 hrs	0,130	74,131	0,028	52,660
09-Nov-09		19.00 hrs	0,154	70,146	0,034	63,089
11-Nov-09		18.50 hrs	0,172	67,298	0,039	73,417
13-Nov-09		18.52 hrs	0,168	67,92	0,036	68,475
14-Dic-09		18.50 hrs	0,141	72,277	0,029	54,013
16-Dic-09		18.52 hrs	0,163	68,707	0,032	60,100
18-Dic-09		18.55 hrs	0,152	70,469	0,028	52,685
20-Dic-09		18.50 hrs	0,187	65,013	0,036	67,101
22-Dic-09		18.57 hrs	0,128	74,473	0,025	46,102
PROMEDIOS:			0,161		0,032	59,853

Figura 4

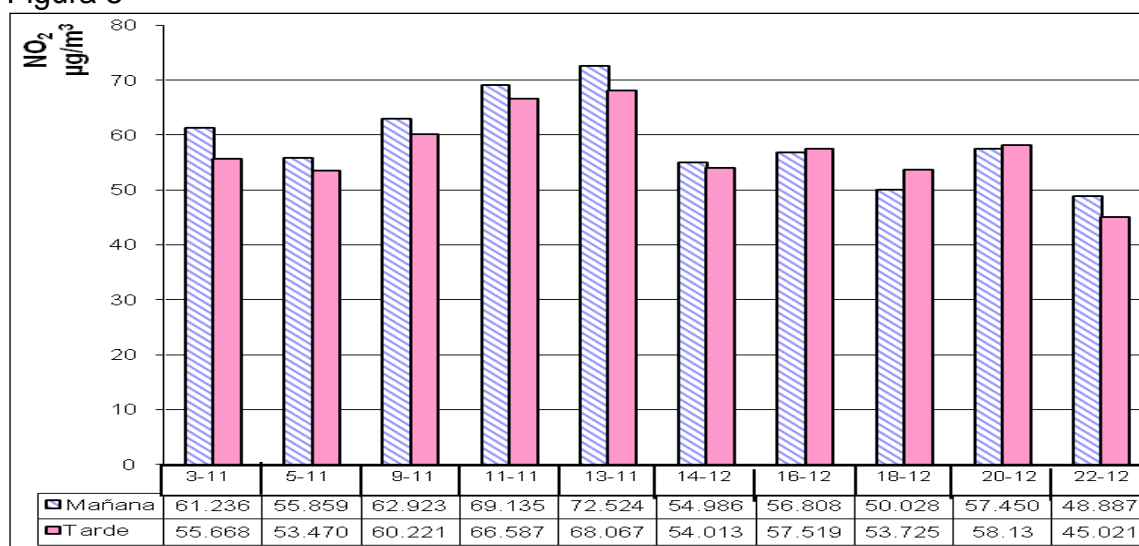


Concentraciones de Dióxido de Nitrógeno – Estación 5

Tabla 5

DIA	HORA		LECTURAS		CONCENTRACIONES	
	Mañana	Tarde	A	%T	ppm	µg/m ³
03-Nov-09	13.30 hrs		0,156	69,823	0,033	61,236
05-Nov-09	13.35 hrs		0,152	70,469	0,030	55,859
09-Nov-09	13.32 hrs		0,167	68,077	0,034	62,923
11-Nov-09	13.30 hrs		0,181	65,917	0,037	69,135
13-Nov-09	13.37 hrs		0,198	63,387	0,039	72,524
14-Dic-09	13.30 hrs		0,154	70,146	0,029	54,986
16-Dic-09	13.38 hrs		0,167	68,077	0,030	56,808
18-Dic-09	13.35 hrs		0,157	69,663	0,027	50,028
20-Dic-09	13.30 hrs		0,176	66,681	0,031	57,450
22-Dic-09	13.33 hrs		0,138	72,778	0,026	48,887
03-Nov-09		19.30 hrs	0,135	73,282	0,030	55,668
05-Nov-09		19.35 hrs	0,132	73,790	0,028	53,470
09-Nov-09		19.30 hrs	0,147	71,285	0,032	60,221
11-Nov-09		19.30 hrs	0,156	69,823	0,035	66,587
13-Nov-09		19.32 hrs	0,167	68,077	0,036	68,067
14-Dic-09		19.30 hrs	0,141	72,277	0,029	54,013
16-Dic-09		19.32 hrs	0,156	69,823	0,031	57,519
18-Dic-09		19.35 hrs	0,155	69,984	0,029	53,725
20-Dic-09		19.30 hrs	0,162	68,865	0,031	58,13
22-Dic-09		19.37 hrs	0,125	74,989	0,024	45,021
PROMEDIOS:			0,156		0,031	58,113

Figura 5

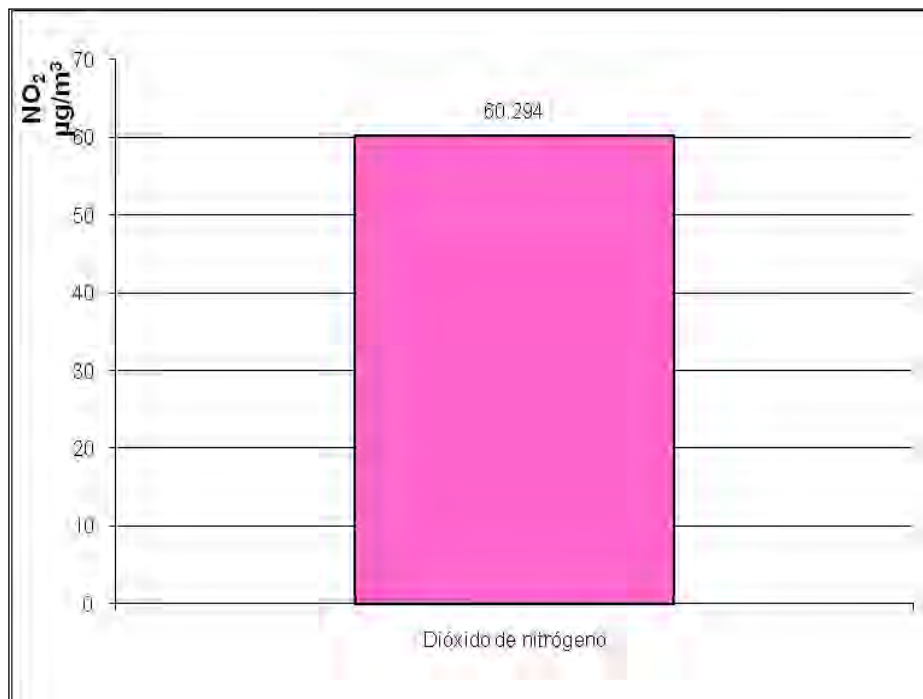


Concentración promedio general del dióxido de nitrógeno

Tabla 6

Contaminante	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Dióxido de nitrógeno	60,294

Figura 6

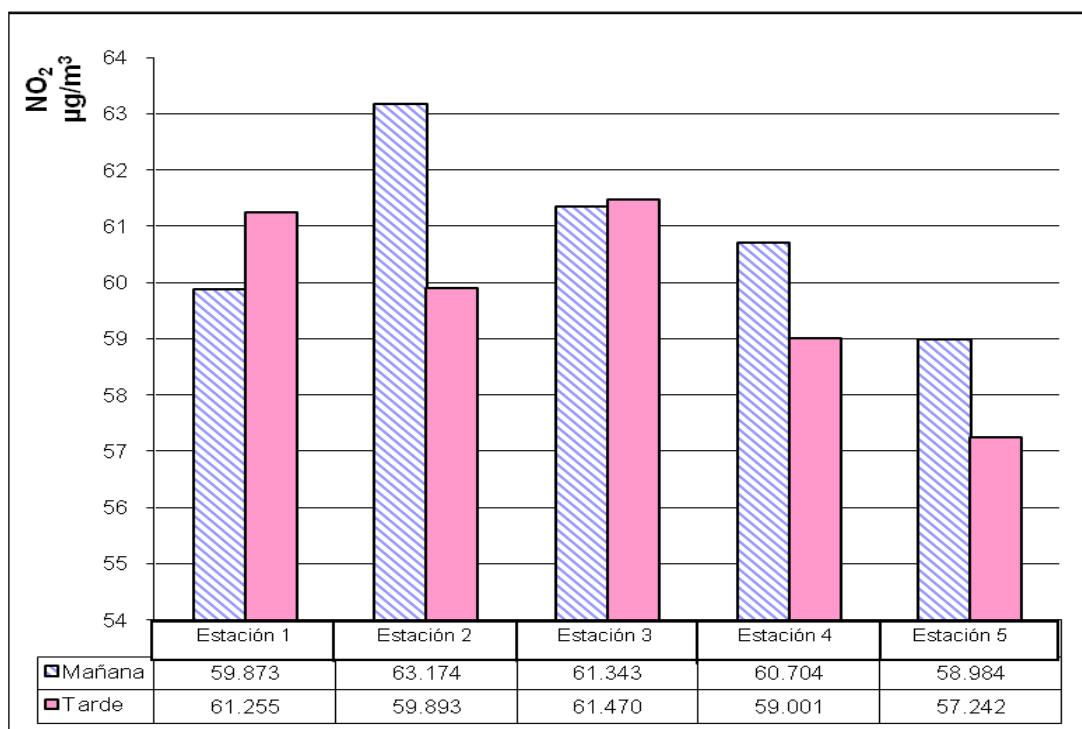


Comparación entre los valores de mañana y tarde por estaciones de muestreo,
para el dióxido de nitrógeno ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Tabla 7

Estación	Mañana	Tarde	Promedio Total
1	59,873	61,255	60,564
2	63,174	59,893	61,533
3	61,343	61,470	61,406
4	60,704	59,001	59,853
5	58,984	57,242	58,113
Promedio	60,816	59,772	60,294

Figura 7

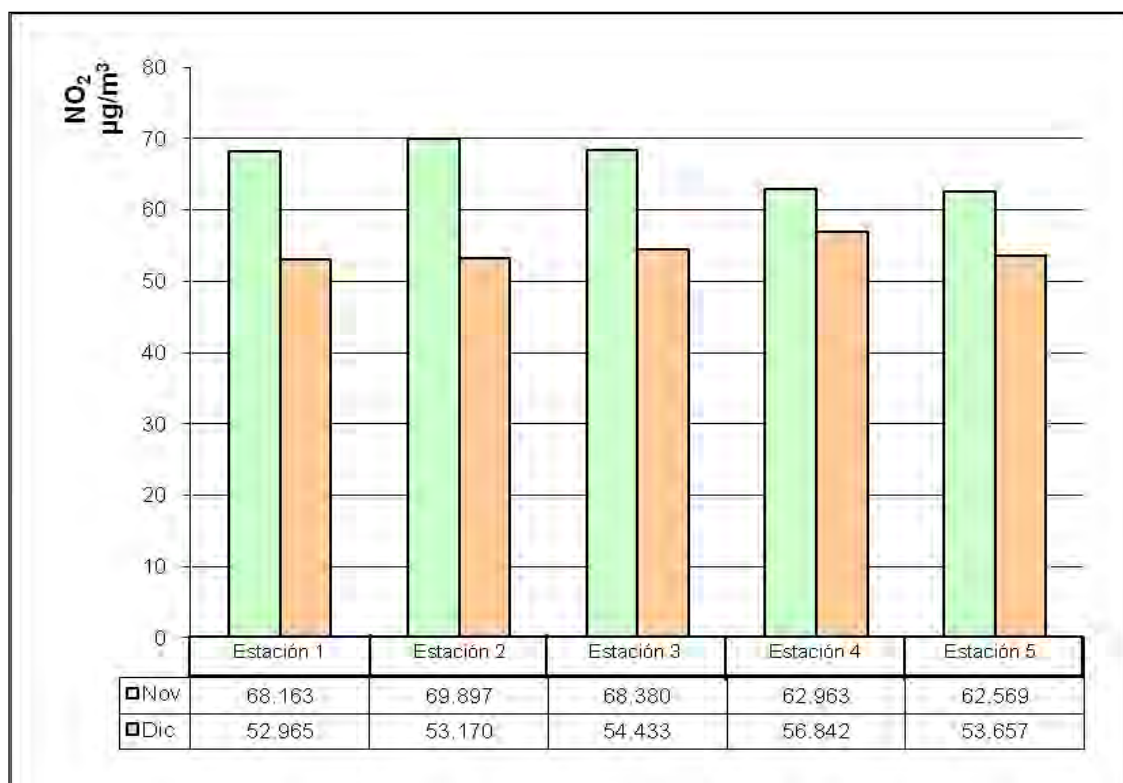


Comparación entre los valores de noviembre y diciembre por estaciones de muestreo, para el dióxido de nitrógeno ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Tabla 8

Estación	Noviembre	Diciembre
1	68,163	52,965
2	69,897	53,170
3	68,380	54,433
4	62,963	56,842
5	62,569	53,657

Figura 8

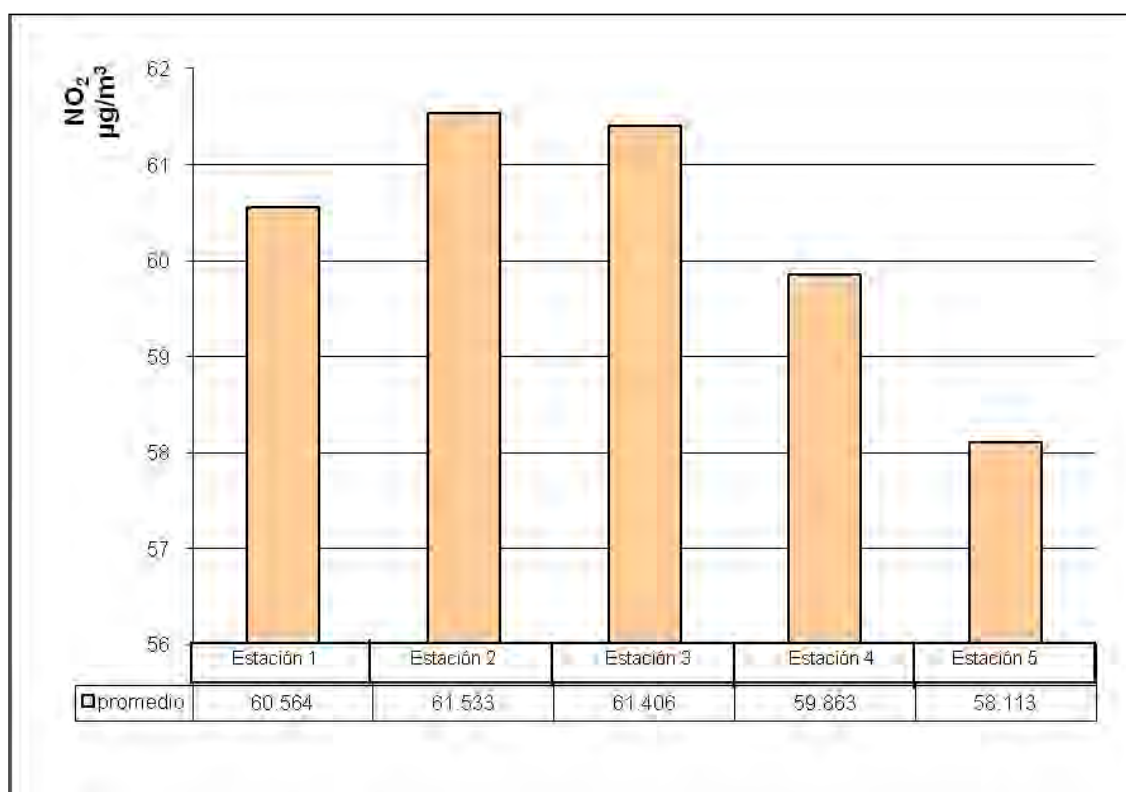


Concentración promedio por estaciones de muestreo
para el dióxido de nitrógeno ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Tabla 9

Estaciones	NO ₂
1	60,564
2	61,533
3	61,406
4	59,863
5	58,113
Promedio	60,294

Figura 9

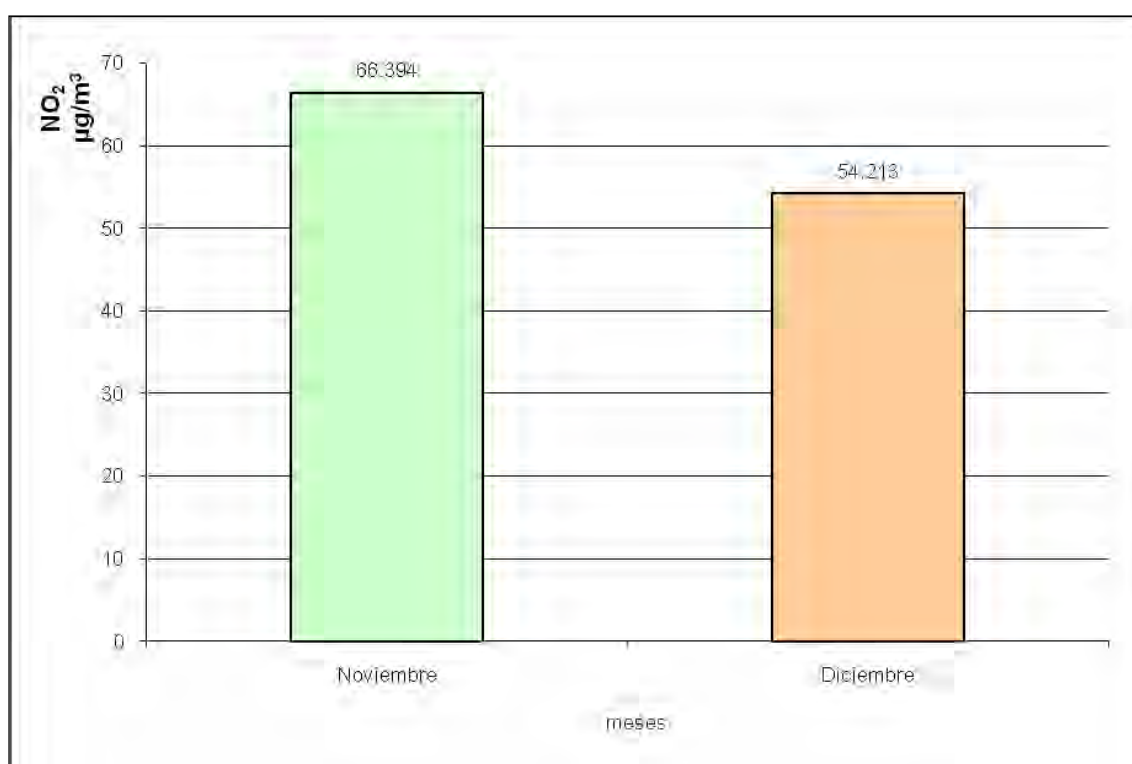


Comparación general entre noviembre y diciembre, de las concentraciones de dióxido de nitrógeno ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Tabla 10

NO₂	Noviembre	Diciembre
$\mu\text{g}/\text{m}^3$	66,394	54,213

Figura 10



Valores máximos y mínimos por estaciones de muestreo
para el dióxido de nitrógeno ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

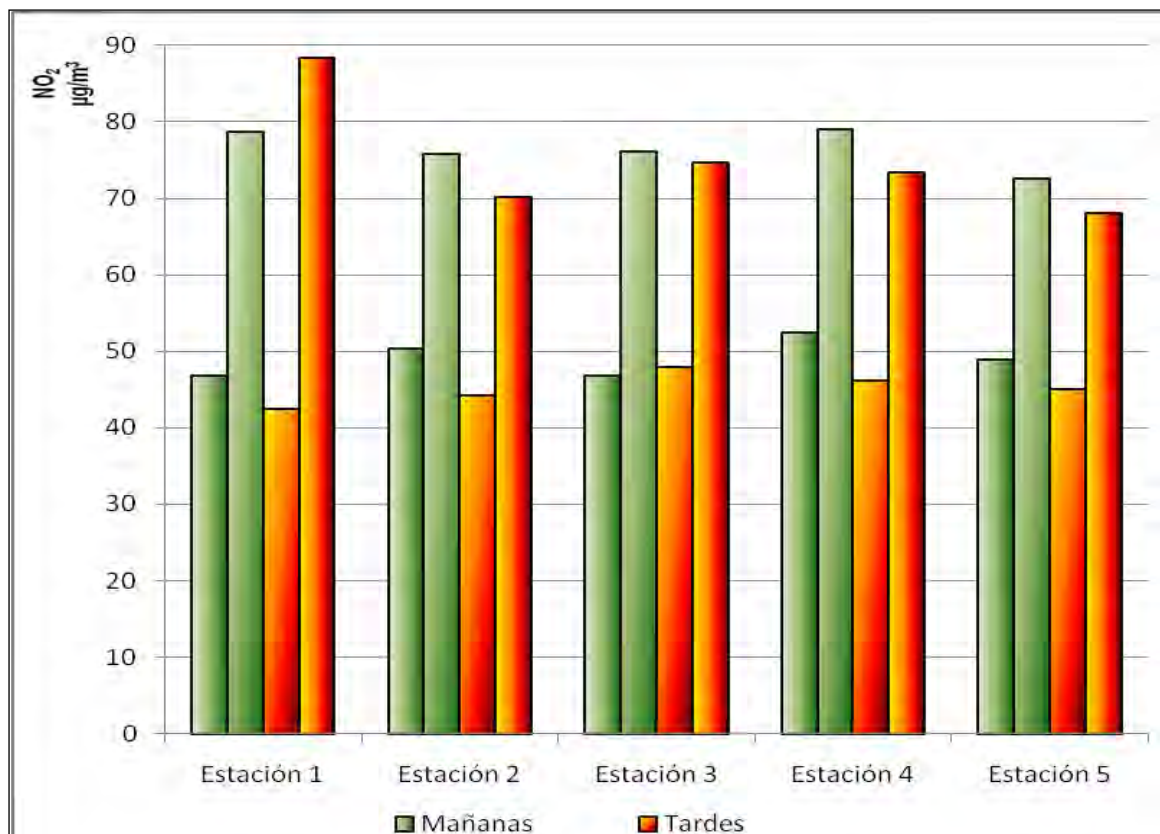
Tabla 11

Est	MAÑANAS			TARDES		
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio
1	46,762	78,751	59,873	42,500	88,356	61,255
2	50,406	75,744	63,174	44,282	70,156	59,893
3	46,874	76,155	61,343	47,857	74,750	61,470
4	52,430	79,065	60,704	46,102	73,417	59,001
5	48,887	72,524	58,984	45,021	68,067	57,242

VALOR MÁXIMO = 88,356 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Estación 1)

VALOR MÍNIMO = 42,500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Estación 1)

Figura 11



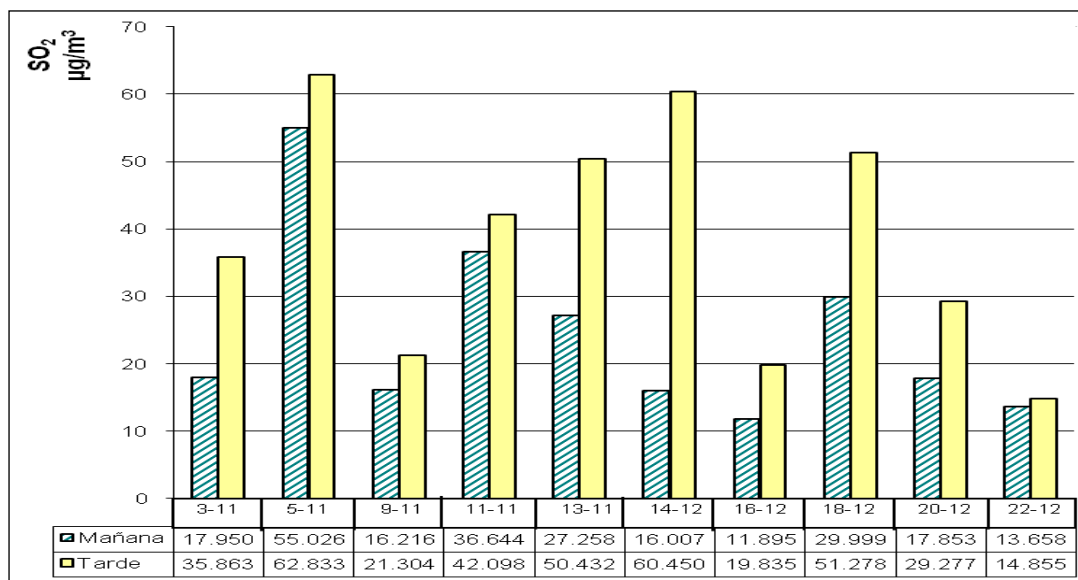
9.2.- Dióxido de Azufre

Concentraciones de Dióxido de Azufre – Estación 1

Tabla 12

DIA	HORA		LECTURAS		CONCENTRACIONES	
	Mañana	Tarde	A	Δ A	ppm	μg/m ³
03-Nov-09	12.20 hrs		0,791	0,051	0,007	17,950
05-Nov-09	12.25 hrs		0,924	0,167	0,021	55,026
09-Nov-09	12.22 hrs		0,798	0,048	0,006	16,216
11-Nov-09	12.20 hrs		0,845	0,107	0,014	36,644
13-Nov-09	12.27 hrs		0,791	0,083	0,010	27,258
14-Dic-09	12.20 hrs		0,779	0,050	0,006	16,007
16-Dic-09	12.28 hrs		0,743	0,039	0,005	11,895
18-Dic-09	12.25 hrs		0,829	0,105	0,011	29,999
20-Dic-09	12.20 hrs		0,785	0,061	0,007	17,853
22-Dic-09	12.23 hrs		0,751	0,043	0,005	13,658
03-Nov-09		18.20 hrs	0,837	0,097	0,014	35,863
05-Nov-09		18.25 hrs	0,930	0,173	0,024	62,833
09-Nov-09		18.30 hrs	0,808	0,058	0,008	21,304
11-Nov-09		18.20 hrs	0,848	0,110	0,016	42,098
13-Nov-09		18.22 hrs	0,846	0,138	0,019	50,432
14-Dic-09		18.20 hrs	0,905	0,176	0,023	60,450
16-Dic-09		18.32 hrs	0,764	0,060	0,008	19,835
18-Dic-09		18.25 hrs	0,889	0,165	0,020	51,278
20-Dic-09		18.20 hrs	0,815	0,091	0,011	29,277
22-Dic-09		18.27 hrs	0,754	0,046	0,006	14,855
PROMEDIOS:			0,822	0,093	0,012	31,537

Figura 12

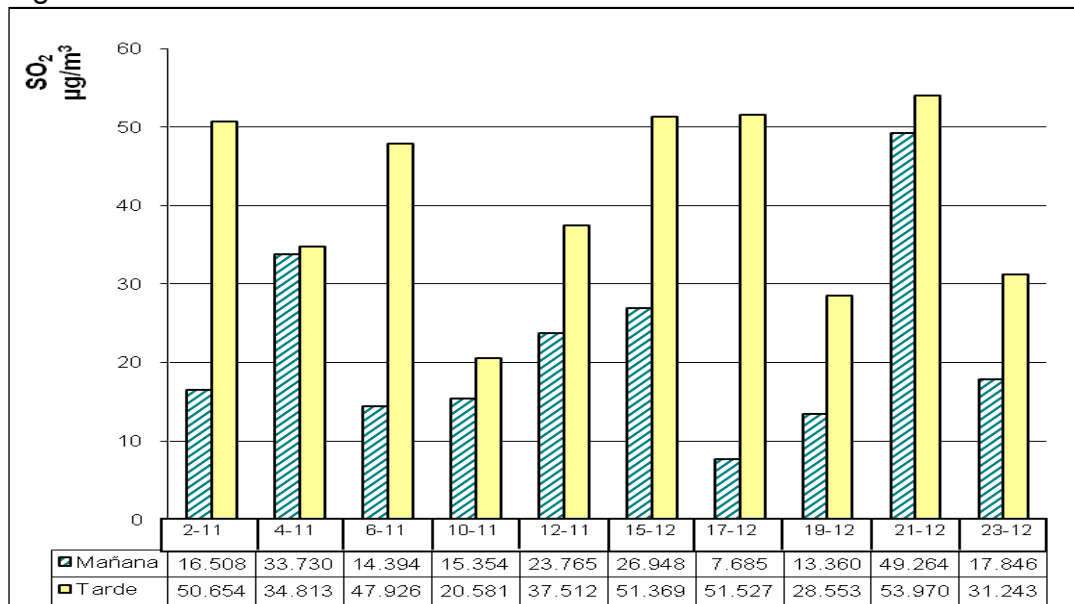


Concentraciones de Dióxido de Azufre – Estación 2

Tabla 13

DIA	HORA		LECTURAS		CONCENTRACIONES	
	Mañana	Tarde	A	Δ A	ppm	µg/m ³
02-Nov-09	12.20 hrs		0,769	0,048	0,006	16,508
04-Nov-09	12.25 hrs		0,846	0,100	0,013	33,730
06-Nov-09	12.22 hrs		0,789	0,039	0,006	14,394
10-Nov-09	12.20 hrs		0,780	0,045	0,006	15,354
12-Nov-09	12.27 hrs		0,806	0,068	0,009	23,765
15-Dic-09	12.20 hrs		0,926	0,088	0,010	26,948
17-Dic-09	12.28 hrs		0,922	0,179	0,003	51,527
19-Dic-09	12.25 hrs		0,788	0,045	0,005	13,360
21-Dic-09	12.20 hrs		0,881	0,157	0,019	49,264
23-Dic-09	12.23 hrs		0,773	0,055	0,007	17,846
02-Nov-09		18.20 hrs	0,860	0,139	0,019	50,654
04-Nov-09		18.25 hrs	0,840	0,094	0,013	34,813
06-Nov-09		18.30 hrs	0,878	0,128	0,018	47,926
10-Nov-09		18.20 hrs	0,789	0,054	0,008	20,581
12-Nov-09		18.22 hrs	0,837	0,099	0,014	37,512
15-Dic-09		18.20 hrs	0,992	0,154	0,020	51,369
17-Dic-09		18.32 hrs	0,985	0,024	0,020	7,685
19-Dic-09		18.25 hrs	0,831	0,088	0,011	28,553
21-Dic-09		18.20 hrs	0,891	0,167	0,021	53,970
23-Dic-09		18.27 hrs	0,814	0,096	0,012	31,243
PROMEDIOS:			0,850	0,093	0,012	31,350

Figura 13

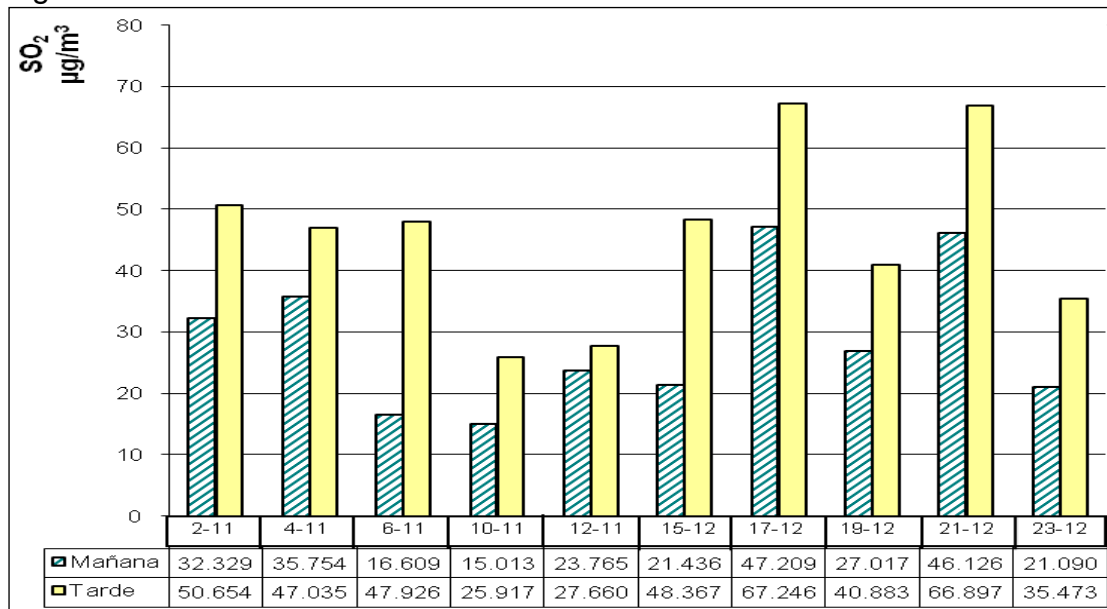


Concentraciones de Dióxido de Azufre – Estación 3

Tabla 14

DIA	HORA		LECTURAS		CONCENTRACIONES	
	Mañana	Tarde	A	Δ A	ppm	μg/m ³
02-Nov-09	13.20 hrs		0,815	0,094	0,012	32,329
04-Nov-09	13.25 hrs		0,852	0,106	0,014	35,754
06-Nov-09	13.22 hrs		0,795	0,045	0,006	16,609
10-Nov-09	13.20 hrs		0,779	0,044	0,006	15,013
12-Nov-09	13.27 hrs		0,784	0,068	0,009	23,765
15-Dic-09	13.20 hrs		0,908	0,070	0,008	21,436
17-Dic-09	13.28 hrs		0,907	0,164	0,018	47,209
19-Dic-09	13.25 hrs		0,834	0,091	0,010	27,017
21-Dic-09	13.20 hrs		0,871	0,147	0,018	46,126
23-Dic-09	13.23 hrs		0,783	0,065	0,008	21,090
02-Nov-09		19.20 hrs	0,877	0,139	0,019	50,654
04-Nov-09		19.25 hrs	0,873	0,127	0,018	47,035
06-Nov-09		19.30 hrs	0,873	0,128	0,018	47,926
10-Nov-09		19.20 hrs	0,803	0,068	0,010	25,917
12-Nov-09		19.22 hrs	0,811	0,073	0,011	27,660
15-Dic-09		19.20 hrs	0,983	0,145	0,019	48,367
17-Dic-09		19.32 hrs	0,953	0,210	0,026	67,246
19-Dic-09		19.25 hrs	0,869	0,126	0,016	40,883
21-Dic-09		19.20 hrs	0,931	0,207	0,026	66,897
23-Dic-09		19.27 hrs	0,827	0,109	0,014	35,473
PROMEDIOS:			0,856	0,111	0,014	37,220

Figura 14

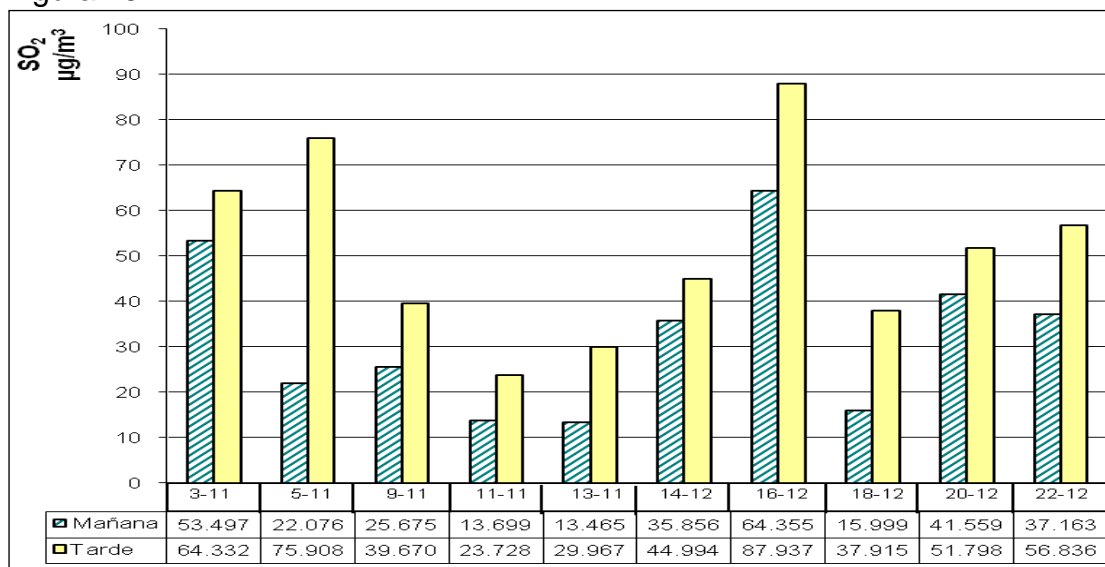


Concentraciones de Dióxido de Azufre – Estación 4

Tabla 15

DIA	HORA		LECTURAS		CONCENTRACIONES	
	Mañana	Tarde	A	Δ A	ppm	µg/m ³
03-Nov-09	13.10 hrs		0,784	0,044	0,006	53.497
05-Nov-09	13.15 hrs		0,913	0,156	0,020	22.076
09-Nov-09	13.12 hrs		0,789	0,039	0,005	25.675
11-Nov-09	13.10 hrs		0,789	0,051	0,007	13.699
13-Nov-09	13.17 hrs		0,766	0,058	0,007	13.465
14-Dic-09	13.10 hrs		0,781	0,052	0,006	35.856
16-Dic-09	13.18 hrs		0,774	0,070	0,008	64.355
18-Dic-09	13.15 hrs		0,791	0,067	0,007	15.999
20-Dic-09	13.10 hrs		0,793	0,069	0,008	41.559
22-Dic-09	13.13 hrs		0,754	0,046	0,006	37.163
03-Nov-09		19.10 hrs	0,929	0,189	0,027	64.332
05-Nov-09		19.15 hrs	0,966	0,209	0,029	75.908
09-Nov-09		19.20 hrs	0,799	0,049	0,007	39.670
11-Nov-09		19.10 hrs	0,831	0,093	0,014	23.728
13-Nov-09		19.12 hrs	0,779	0,071	0,01	29.967
14-Dic-09		19.10 hrs	0,894	0,165	0,022	44.994
16-Dic-09		19.22 hrs	0,913	0,209	0,026	87.937
18-Dic-09		19.15 hrs	0,823	0,099	0,012	37.915
20-Dic-09		19.10 hrs	0,827	0,103	0,013	51.798
22-Dic-09		19.17 hrs	0,863	0,155	0,019	56.836
PROMEDIOS:			0,828	0,100	0,013	41.821

Figura 15

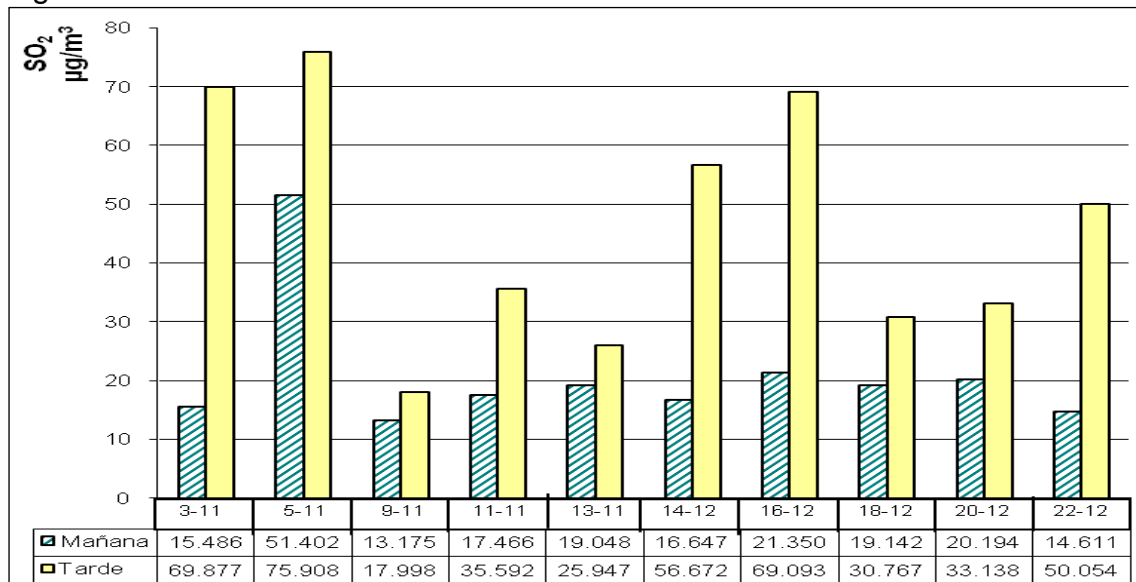


Concentraciones de Dióxido de Azufre – Estación 5

Tabla 16

DIA	HORA		LECTURAS		CONCENTRACIONES	
	Mañana	Tarde	A	Δ A	ppm	μg/m ³
03-Nov-09	13.50 hrs		0,892	0,152	0,020	15,486
05-Nov-09	13.55 hrs		0,824	0,067	0,008	51,402
09-Nov-09	13.52 hrs		0,826	0,076	0,010	13,175
11-Nov-09	13.50 hrs		0,778	0,040	0,005	17,466
13-Nov-09	13.57 hrs		0,749	0,041	0,005	19,048
14-Dic-09	13.50 hrs		0,841	0,112	0,014	16,647
16-Dic-09	13.58 hrs		0,915	0,211	0,025	21,350
18-Dic-09	13.55 hrs		0,780	0,056	0,006	19,142
20-Dic-09	13.50 hrs		0,866	0,142	0,016	20,194
22-Dic-09	13.53 hrs		0,825	0,117	0,014	14,611
03-Nov-09		19.50 hrs	0,914	0,174	0,025	69,877
05-Nov-09		19.55 hrs	0,966	0,209	0,029	75,908
09-Nov-09		19.50 hrs	0,799	0,108	0,015	17,998
11-Nov-09		19.50 hrs	0,800	0,062	0,009	35,592
13-Nov-09		19.52 hrs	0,790	0,082	0,011	25,947
14-Dic-09		19.50 hrs	0,860	0,131	0,017	56,672
16-Dic-09		19.52 hrs	0,970	0,266	0,034	69,093
18-Dic-09		19.55 hrs	0,846	0,122	0,015	30,767
20-Dic-09		19.50 hrs	0,885	0,161	0,020	33,138
22-Dic-09		19.57 hrs	0,884	0,176	0,022	50,054
PROMEDIOS:			0,851	0,125	0,016	33,678

Figura 16

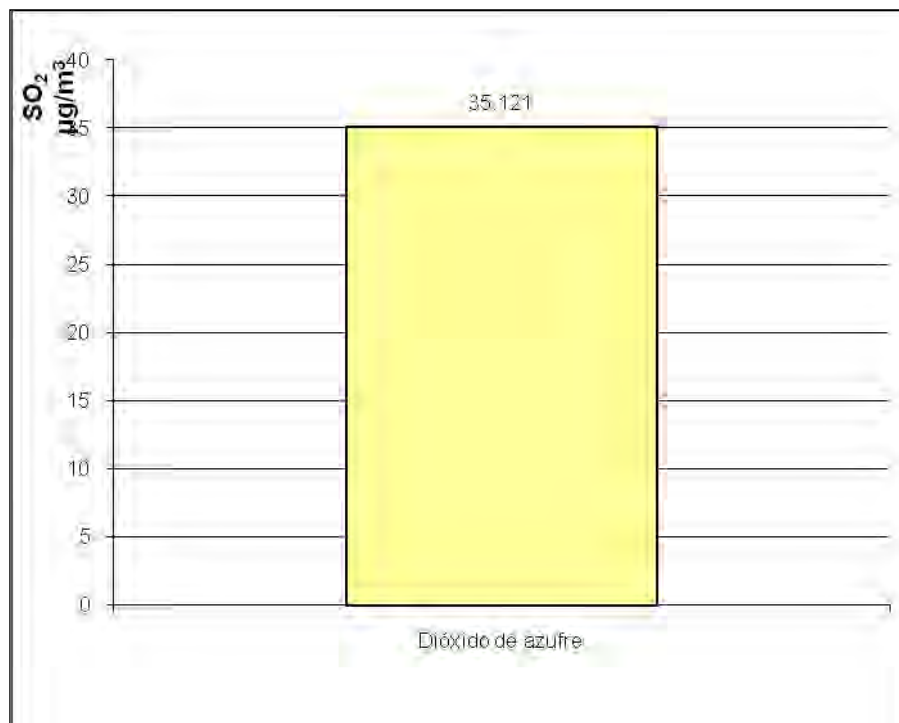


Concentración promedio general del dióxido de azufre

Tabla 17

Contaminante	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Dióxido de azufre	35,121

Figura 17

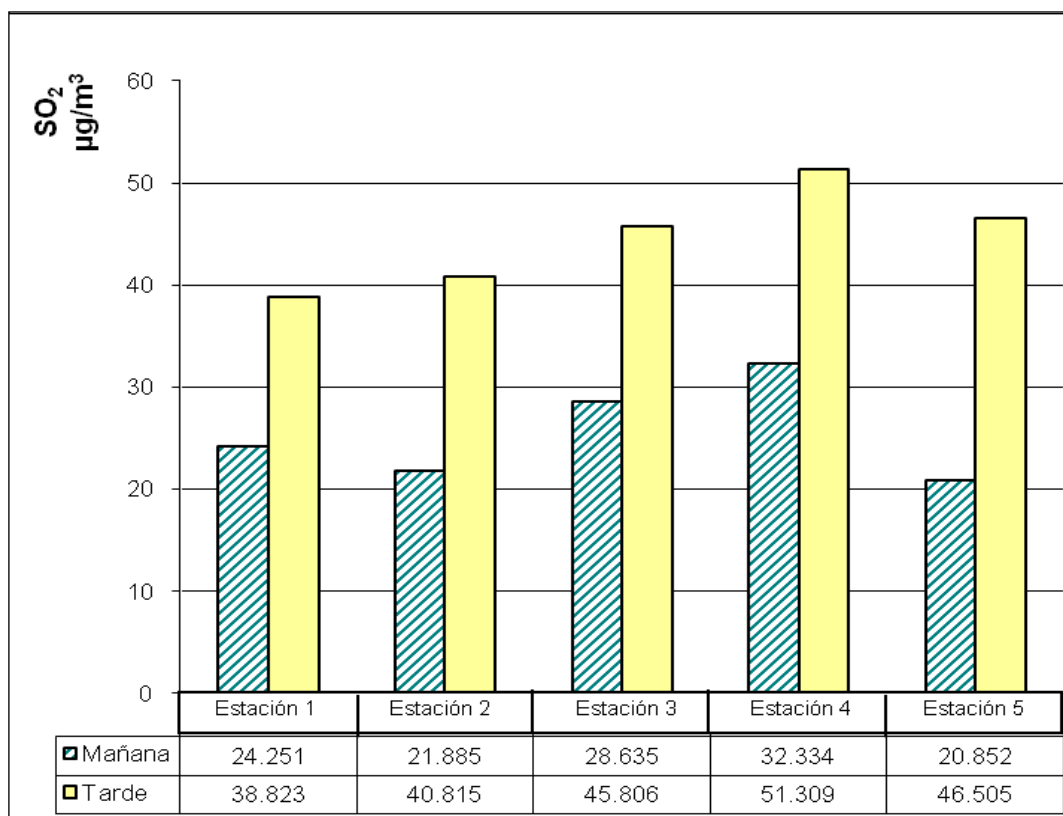


Comparación entre los valores de mañana y tarde por estaciones de muestreo,
para el dióxido de azufre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Tabla 18

Estación	Mañana	Tarde	Promedio Total
1	24,251	38,823	31,537
2	21,885	40,815	31,35
3	28,635	45,806	37,22
4	32,334	51,309	41,821
5	20,852	46,505	33,678
Promedio	25,591	44,652	35,121

Figura 18

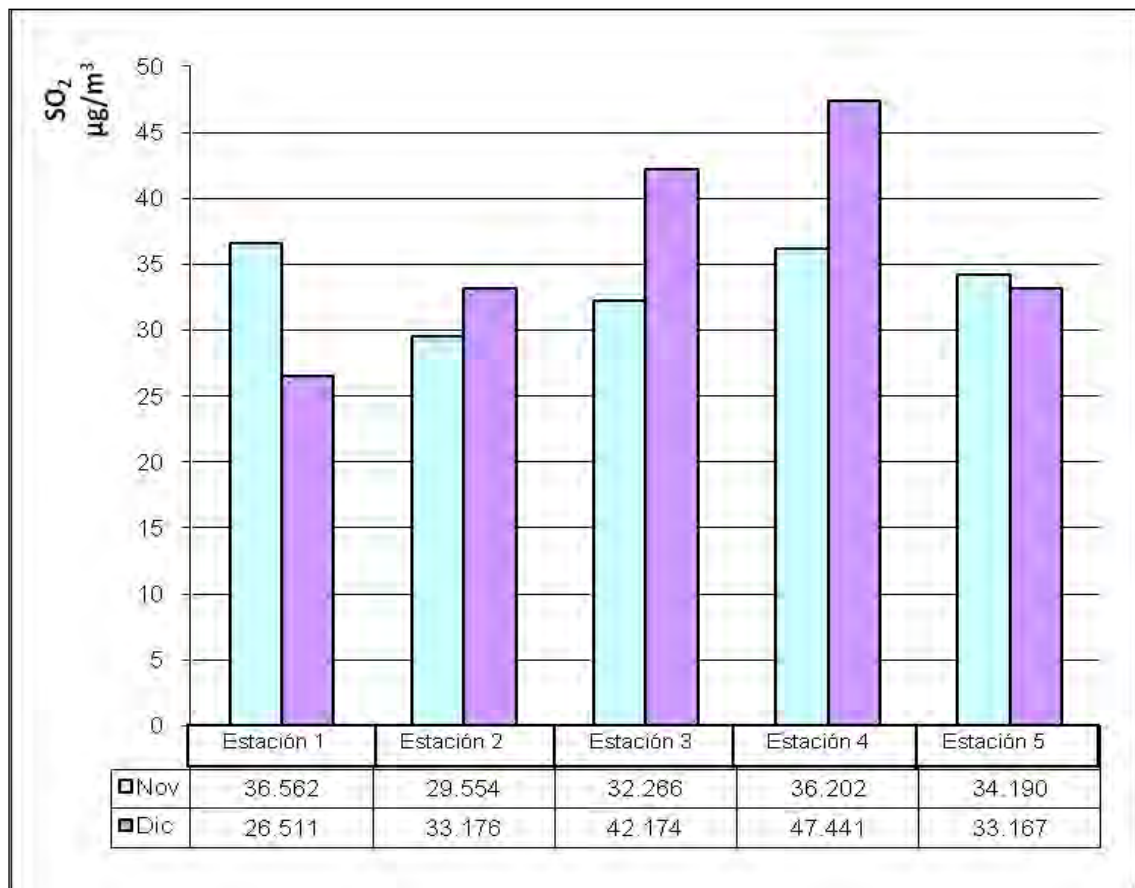


Comparación entre los valores de noviembre y diciembre por estaciones de muestreo, para el dióxido de azufre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Tabla 19

Estación	Noviembre	Diciembre
1	36,562	26,511
2	29,554	33,176
3	32,266	42,174
4	36,202	47,441
5	34,190	33,167

Figura 19

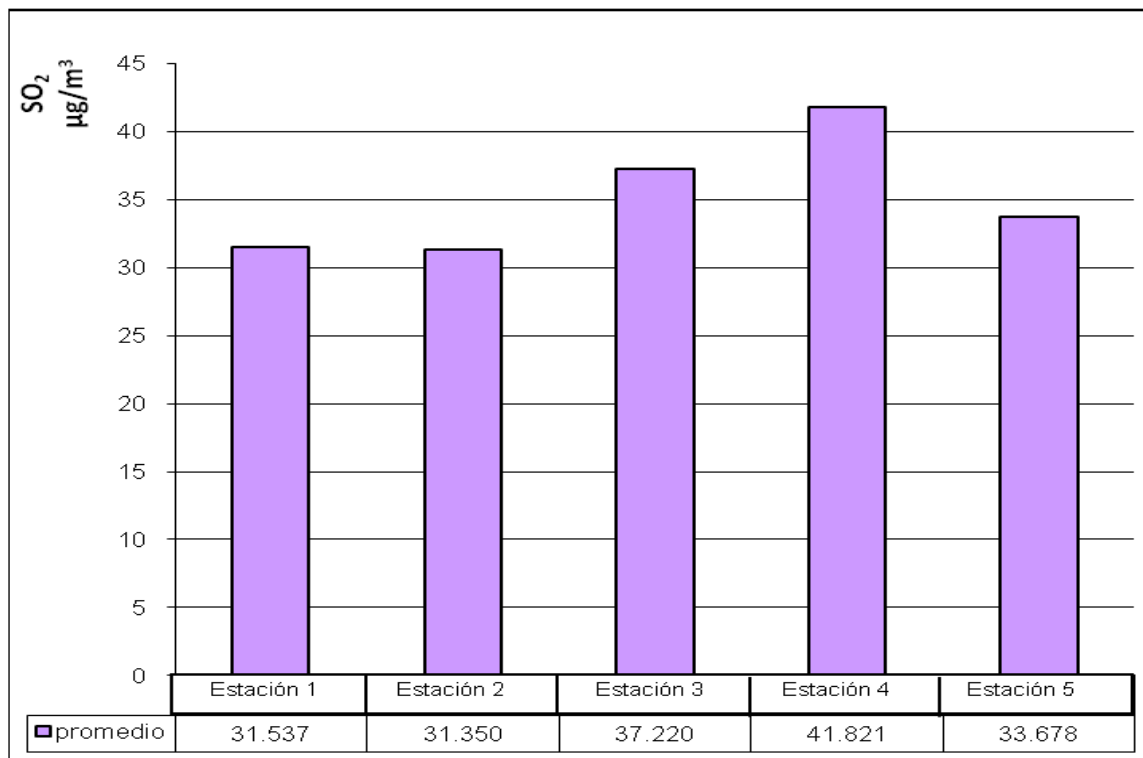


Concentraciones promedio por estaciones de muestreo
para el dióxido de azufre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Tabla 20

Estaciones	SO ₂
1	31,537
2	31,350
3	37,220
4	41,821
5	33,678
Promedio	35,121

Figura 20

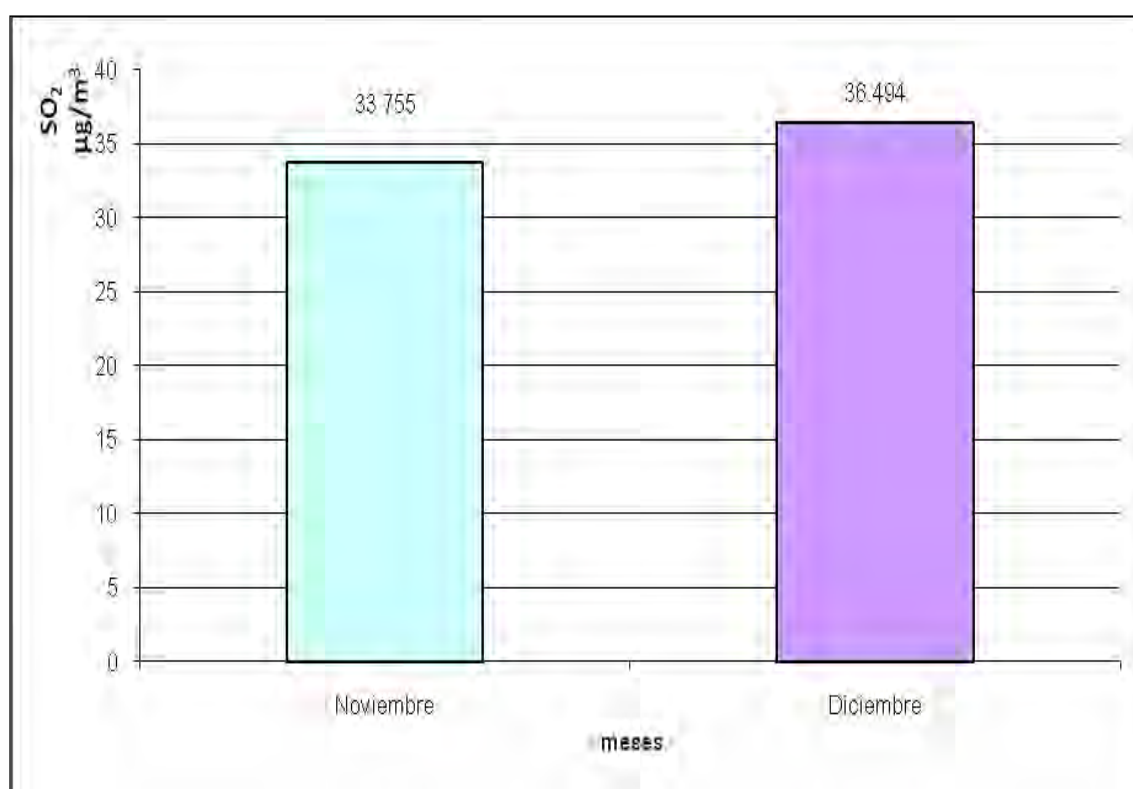


Comparación general entre noviembre y diciembre, de las concentraciones de dióxido de azufre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Tabla 21

NO₂	Noviembre	Diciembre
$\mu\text{g}/\text{m}^3$	33,755	36,494

Figura 21



Valores máximos y mínimos por estaciones de muestreo
para el dióxido de azufre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

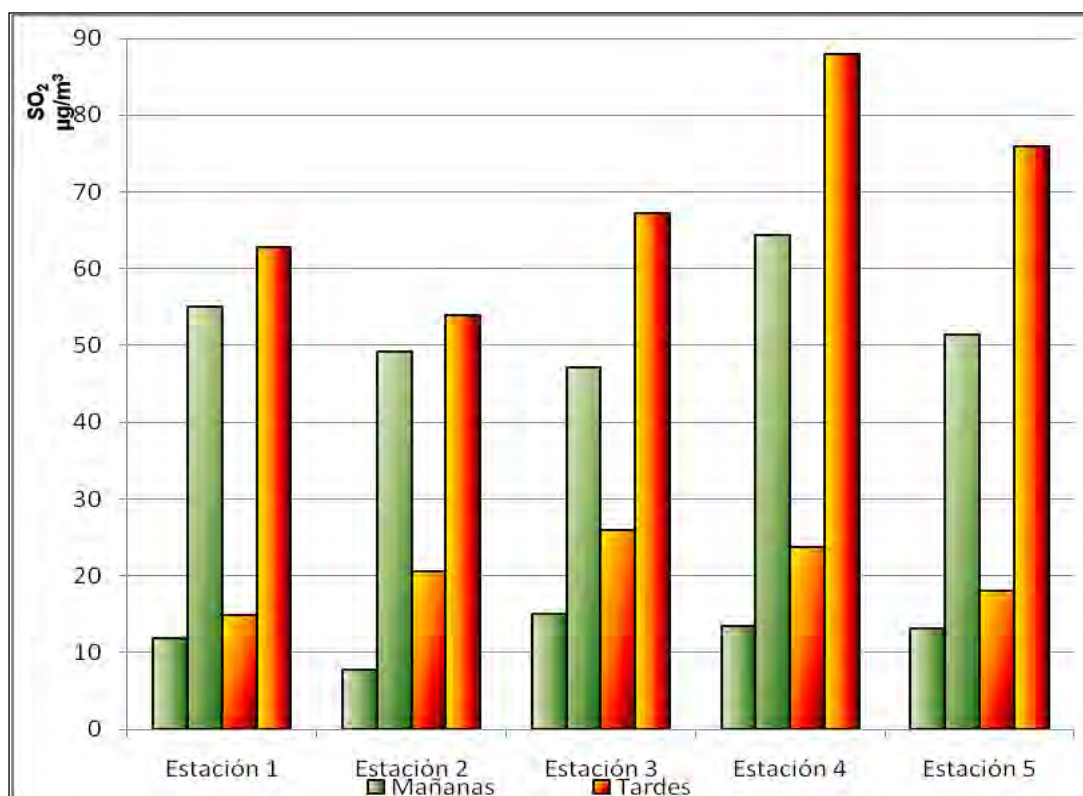
Tabla 22

Est	MAÑANAS			TARDES		
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio
1	11,895	55,026	24,251	14,855	62,833	38,823
2	7,685	49,264	21,885	20,581	53,970	40,815
3	15,013	47,209	28,635	25,917	67,246	45,806
4	13,465	64,355	32,334	23,728	87,937	51,309
5	13,175	51,402	20,852	17,998	75,908	46,505

VALOR MÁXIMO = 87,937 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Estación 4)

VALOR MÍNIMO = 7,685 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Estación 2)

Figura 22



X.- DISCUSIÓN

En el presente trabajo de investigación se determinaron las concentraciones de dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre, en el aire de Lima Metropolitana, durante los meses de noviembre y diciembre de 2009; considerando que ambos gases influyen de manera directa e indirecta en la contaminación ambiental y sobre la salud de la población.

Lima tiene una atmósfera alcalina debido a la falta del recojo adecuado de los residuos sólidos y su disposición en los rellenos sanitarios, a la materia orgánica de las excretas y orina de la población, que careciendo de servicios de alcantarillado, contamina los suelos y las aguas; a la contaminación de las vías públicas y a las emanaciones provenientes de las fábricas de harina de pescado.³⁸

El método de referencia de la EPA para el dióxido de nitrógeno es el Método del Arsenito de Sodio, mientras que para el dióxido de azufre es el Método de Redpanaire; pero ambos métodos no han resultado satisfactorios en Lima por la alcalinidad de su atmósfera, debido a la presencia de amoníaco. Por lo cual se utilizaron los métodos descritos con anterioridad por ser los más recomendados para desarrollar trabajos de campo donde implique el traslado a diferentes zonas de muestreo; pudiendo lograrse resultados visibles y cuantificables. Además necesitan de un simple aparato para la recolección de las muestras y el costo es moderado.

Las conexiones y empalmes del equipo muestreador fueron asegurados durante cada toma de muestra a fin de mantener la hermeticidad del equipo y evitar errores en el muestreo.

Asimismo, los materiales de vidrio utilizados durante el muestreo y los análisis en el laboratorio, fueron cuidadosamente lavados para asegurar la validez de los resultados.

Realizado el muestreo por un período de dos meses (noviembre – diciembre de 2009), con 20 días efectivos, 200 muestras analizadas, con una frecuencia de 10 muestras diarias (cuatro muestras por punto en dos o tres puntos diarios), se obtuvieron los resultados indicados.

Para hallar el volumen real de aire muestreado, se corrigió los volúmenes, usando la ecuación de los gases ideales y los datos de temperatura y presión proporcionados por el SENAMHI, según el Anexo N° 1.

Se utilizó las gráficas de barras para poder describir los resultados y sus variaciones en los horarios, días y estaciones de muestreo, respectivos.

Según la figura 7, observamos que la diferencia de concentraciones de dióxido de nitrógeno entre el medio día y la tarde, no es considerable. Teóricamente la formación del dióxido de nitrógeno aumenta con la temperatura; y ésta es mayor al medio día que en la tarde. Esta ligera variación, que según la teoría debiera ser considerable, durante el estudio de vio alterado por factores meteorológicos y el cambio climático.

Según la figura 18, se muestra constante para el dióxido de azufre, que en todas las muestras analizadas, aquellas reportadas en horas de la mañana presentan una concentración menor a las reportadas en horas de la tarde, además, se presenta de la misma manera, que las temperaturas al medio día son en promedio más elevadas que las temperaturas de la tarde. Esto puede indicarnos la existencia de una relación inversamente proporcional entre la temperatura y la concentración de dióxido de azufre en el aire; así, a mayor temperatura, menor concentración encontrada de SO₂ en el ambiente. Además, el fenómeno de turbulencia que ocurre en las horas de la mañana, diluye el contaminante; y el fenómeno de inversión térmica que ocurre en las tardes, hace que el contaminante quede encerrado en la tropósfera; aumentando así su concentración.

La estación 2, ubicada en la Plaza Grau, es la que reportó el mayor promedio de concentración de dióxido de nitrógeno, durante el tiempo que duró el estudio; el cual fue de $61,533 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

La estación 4, ubicada en el cruce de la Av. Abancay con Av. Nicolás de Piérola, es la que reportó el mayor promedio de concentraciones de dióxido de azufre, durante el tiempo que duró el estudio; cuyo valor fue de $41,821 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Los estudios de la DIGESA, según el Anexo 3, muestran las concentraciones de dióxido de nitrógeno de febrero a setiembre de 2009, en diferentes estaciones de muestreo de Lima Metropolitana y el Callao. La concentración promedio de dióxido de nitrógeno durante estos ocho meses, en la estación de Lima Cercado (Cruce de Av. Abancay y Jr. Ancash) fue de $37,375 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Este valor, inferior al promedio de $60,294 \mu\text{g}/\text{m}^3$ encontrado en el presente estudio; se debe a que la DIGESA utilizó un método pasivo de toma de muestra; mientras que el presente estudio utilizó un método activo. Además, la diferencia en los resultados se vio influenciado por diversos factores como el incremento de la temperatura en los meses de estudio, el cambio climático, las precipitaciones impropias ocurridas en los días de muestreo, entre otros.

Para el caso del dióxido de azufre, los estudios de la DIGESA, según el Anexo 4, muestran las concentraciones de este contaminante de marzo a setiembre de 2009. La concentración promedio de dióxido de azufre durante estos siete meses, en la estación de Lima Cercado (Cruce de Av. Abancay y Jr. Ancash) fue de $20,143 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Este valor, inferior al promedio de $35,121 \mu\text{g}/\text{m}^3$ encontrado en el presente estudio; se debe a los mismos factores que influyeron en la determinación del dióxido de nitrógeno.

Según esto, las medidas regulatorias que se han implementado, para disminuir las concentraciones de ambos contaminantes en el aire de Lima Metropolitana, no están resultando del todo exitosos; además que el cambio climático y el aumento del parque automotor; favorecen la presencia en la tropósfera, de estos dos gases contaminantes.

Los niveles de concentraciones de ambos contaminantes, por encima de los valores guía (referenciales) de la OMS; deben considerarse como un objetivo, que a futuro debe ser superado a través de la puesta en marcha de políticas a favor de la calidad del aire de Lima Metropolitana; ya que la influencia sobre el deterioro del medio ambiente y sobre la salud pública, de estos dos contaminantes atmosféricos, debe ser abordado como un tema de prioridad nacional en nuestro país.

XI.- CONCLUSIONES

- El promedio de las concentraciones de dióxido de nitrógeno fue de 60,294 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, el cual se encuentra dentro del límite establecido por la Dirección General de Salud Ambiental de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y por encima del valor guía establecido por la Organización Mundial de la Salud de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
- El promedio de las concentraciones de dióxido de azufre fue de 35,121 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, el cual está dentro del límite establecido por la Dirección General de Salud Ambiental de 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y por encima del valor guía establecido por la Organización Mundial de la Salud de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Se observaron variaciones en las concentraciones de ambos contaminantes, debido a la influencia de factores climatológicos como la temperatura, siendo más evidente para el dióxido de azufre.
- La concentración de dióxido de azufre es inversamente proporcional a la temperatura, siendo la concentración promedio al medio día de 25,591 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (22,02 °C) y en las tardes de 44,652 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (20,44 °C).

XII.- RECOMENDACIONES

- Desarrollar más estudios y de mayor duración sobre la calidad del aire de Lima Metropolitana, que permitan establecer un diagnóstico real de los niveles de los contaminantes atmosféricos presentes.
- Optimizar las políticas, programas y planes actuales de mejora de la calidad del aire de Lima Metropolitana.
- Divulgar el conocimiento de la problemática ambiental de Lima Metropolitana, con la iniciativa del estado, y la participación de las empresas, universidades y la sociedad civil.

XIII.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Organización Mundial de la Salud. Guías de la Calidad del Aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Actualización mundial 2005. Ginebra; OMS; 2006.
2. Organización Mundial de la Salud. Informe sobre la salud en el mundo. Reducir los riesgos y promover una vida sana. Ginebra; OMS; 2002.
3. Dirección General de Salud Ambiental: DIGESA. Reglamento de estándares nacionales de calidad ambiental del aire. Decreto Supremo N° 074-2001-PCM del 22 de junio de 2001. Disponible en: http://www.digesa.minsa.gob.pe/pw_deepa/caire/estandares.asp
4. Minam.gob.pe. Ministerio del Ambiente. Lima; [actualizada al 12 de febrero de 2010] disponible en <http://www.minam.gob.pe>.
5. Ministerio del Ambiente. Proyecto de Decreto Supremo: Reglamento para la Implementación de los Estándares de Calidad Ambiental para el Aire. Resolución Ministerial N° 021-2010-MINAM del 17 de febrero de 2010. Disponible en: <http://www.sinia.minam.gob.pe/index.php>
6. Orosco C, Pérez A. Contaminación Ambiental. Una Visión Desde la Química. Departamento de Química. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Burgos; Burgos; 2003.
7. Capó, M. Principios de Ecotoxicología; diagnóstico, tratamiento y gestión del medio ambiente. Madrid: Tébar.; 2007.
8. DJ. Spedding. Contaminación Atmosférica. Barcelona: Reverté; 2002.

9. Velasco E, Bernabé R. Emisiones Biogénicas. México: Instituto Nacional de Ecología; 2004.
10. Seoanez C, Mariano. Tratado de la Contaminación Atmosférica. Problemas, tratamiento y gestión. Barcelona: Mundi – Prensa; 2002.
11. Gómez M. Introducción a la Metodología de la Investigación Científica. Córdova: Brujas; 2006.
12. Servicio Meteorológico Nacional Argentino. Contaminación del Aire. Boletín N° 09. Colección N° 02. Buenos Aires: 2001.
13. Inche, J. Gestión de la Calidad del Aire: Causas, efectos y soluciones. Instituto de Investigación de Ingeniería Industrial – UNMSM. Lima: Ciudad Universitaria; 2004.
14. Stanley E. Introducción a la Química Ambiental. Ciudad de México: Reverté; UNAM; 2007.
15. Collazos C. Manual de Evaluación Ambiental de Proyectos. Lima: Editorial San Marcos; 2005.
16. Consejo Nacional del Ambiente. Primera Comunicación Nacional del Perú sobre Cambio Climático. Lima: INAGGA – CONAM; 2001.
17. Ley General del Ambiente. Ley N° 18611 del 13 de octubre de 2005. Diario Oficial El Peruano; (15 de octubre de 2005).
18. Estándares de Calidad Ambiental para Aire. Decreto Supremo N° 003-2008-MINAM del 21 de agosto del 2008. Diario Oficial El Peruano; (22 de agosto de 2008).

19. Reglamento de estándares nacionales de calidad ambiental del aire. Decreto Supremo N° 074-2001-PCM del 22 de junio del 2001. Diario Oficial El Peruano; (24 de junio del 2001).
20. Pascual, J. Ciencia Química. [en línea]. Valencia; 2009;. Consultado el 15 de enero del 2010. disponible en: <http://www.scribd.com/doc/7116805/Quimica12-La-Quimica-Del-Medio-Ambiente>.
21. Figueruelo, J. Química Física del Ambiente y de los Procesos Medioambientales. Barcelona; Reverté; 2004.
22. Belmar R, Hofmeister V, Michaels D. Contaminantes Atmosféricos. Epidemiología Ambiental: un proyecto para América Latina y El Caribe. Metepec; 1994.
23. Camargo JA, Alonso A. Contaminación por nitrógeno inorgánico en los ecosistemas acuáticos: problemas medioambientales, criterios de calidad del agua, e implicaciones del cambio climático. Ecosistemas, revista científica y técnica de Ecología y medio ambiente. Asociación Española de Ecología Terrestre [en línea]. 2007. Consultado el 5 de enero del 2010. N° 03; disponible en: <http://www.revistaecosistemas.net/pdfs/486.pdf>.
24. Peter O. Análisis de los Contaminantes del Aire. Madrid: Paraninfo; 1981.
25. Marti M, Desoille H. Medicina del Trabajo. Barcelona: Mason; 2002.
26. López I, et al. Ecología. México: Umbral Editorial, S.A. de C.V; 2006.

27. Ministerio del Ambiente – MINAM. Armonización de Redes de Monitoreo de Calidad del Aire. En Taller Compendio Teórico: Armonización de Redes de Monitoreo de Calidad de Aire. Lima; junio 2009.
28. Martínez E. Química 2. México: Thomson. 2006.
29. Flores R, Herrera L. Ecología y Medio Ambiente. México: Thomson; 2006.
30. Castillo C. El dióxido de azufre y sus efectos sobre las plantas. Ciencia abierta [en línea]. 2009. Consultado el 24 de enero del 2010. N° 81; disponible en <http://cabierta.uchile.cl/revista/28/articulos/pdf/edu1.pdf>
31. Lisilla P. Nivel base del dióxido de azufre en el laboratorio de química. Clases libertarias, [en línea] 2008. Consultado el 28 de octubre del 2009. N° 25; disponible en <http://claseslibertarias.blogspot.com/2008/05/nivel-base-de-dixido-de-azufre-en-el.html>
32. Evolución de la Calidad del Aire en Santiago. “Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana”. Santiago. 2004. Disponible en www.sinia.cl/1292/articles-39731-recursos-1.pdf
33. “Calidad del Aire de la Ciudad de México”. Informe Anual 2008. SIMAT-Secretaría del Medio Ambiente. Disponible en www.sma.df.gob.mx/simat2/informe2008/index.php
34. Estudio de la calidad del aire de la ciudad de Lima Metropolitana. Dirección General de Salud Ambiental – DIGESA [en línea] 1999. Consultado el 15 de noviembre del 2009. Disponible en: www.digesa.sld.pe/aire/pdf/ecal1999.pdf

35. Chocano T. Dávila P. Cuantificación Espectrofotométrica de Dióxido de Nitrógeno en Lima Metropolitana. [Tesis Pregrado]. Lima: Facultad de Farmacia y Bioquímica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos; 1992.
36. Alegre S, et al. Distribución Espacial y Estacional del Dióxido de Azufre en Lima Metropolitana. [Tesis Pregrado]. Lima: Facultad de Farmacia y Bioquímica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos; 1994.
37. Klepel Consulting S.A.C Medición de la Contaminación del Aire durante el Día Interamericano de la Calidad del Aire, 10 de agosto de 2007. Municipalidad de Miraflores [en línea] 2007. Consultado el 25 de enero del 2010. Disponible en: <http://co122w.col122.mail.live.com/default.aspx?wa=wsignin1.0>
38. Vines A. Contaminación Ambiental y Defensa Ecológica de Lima. Sistema Ecológico Natural. Editorial Yuracmayo. Perú. 1993

XIV.- ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO 1:** DATOS REALES DE PRESIÓN Y TEMPERATURA
SOLICITADOS AL SENAMHI
- ANEXO 2:** VOLÚMENES CORREGIDOS CON DATOS REALES DE
PRESIÓN TEMPERATURA
- ANEXO 3:** VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN MENSUAL DE DIÓXIDO
DE NITRÓGENO DURANTE EL 2009 EN LAS ESTACIONES DE
LIMA Y CALLAO (DIGESA)
- ANEXO 4:** VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN MENSUAL DE DIÓXIDO
DE AZUFRE DURANTE EL 2009 EN LAS ESTACIONES DE
LIMA Y CALLAO (DIGESA)
- ANEXO 5:** REGISTROS FOTOGRÁFICOS DEL EQUIPO DE TOMA DE
MUESTRA
- ANEXO 6:** REGISTROS FOTOGRÁFICOS DE LAS ESTACIONES DE
MUESTREO
- ANEXO 7:** REGISTROS FOTOGRÁFICOS DE LOS ANÁLISIS EN EL
LABORATORIO DE LA FACULTAD DE FARMACIA Y
BIOQUÍMICA

ANEXO 1

DATOS REALES DE PRESIÓN Y TEMPERATURA SOLICITADOS AL SENAMHI

DATOS DE PRESIÓN (Pascal) – NOVIEMBRE

MES/AÑO	VARIABLE	DÍA	FECHA	12 HORAS	18 HORAS
NOV-09	PRESIÓN	L	02 – NOV	1001,8	999,8
NOV-09	PRESIÓN	M	03 – NOV	1000,4	998,8
NOV-09	PRESIÓN	K	04 – NOV	1001,3	1000,4
NOV-09	PRESIÓN	J	05 – NOV	1001,3	1001,6
NOV-09	PRESIÓN	V	06 – NOV	1002,4	1000,8
NOV-09	PRESIÓN	L	09 – NOV	998,2	997,5
NOV-09	PRESIÓN	M	10 – NOV	998,5	997,5
NOV-09	PRESIÓN	K	11 – NOV	997,5	996,2
NOV-09	PRESIÓN	J	12 – NOV	998,2	996,8
NOV-09	PRESIÓN	V	13 - NOV	998,1	997,5

DATOS DE TEMPERATURA (°C) – NOVIEMBRE

MES/AÑO	VARIABLE	DÍA	FECHA	12 HORAS	18 HORAS
NOV-09	TEMPERATURA	L	02 – NOV	20,7	19,5
NOV-09	TEMPERATURA	M	03 – NOV	20,2	19,2
NOV-09	TEMPERATURA	K	04 – NOV	21,1	19,2
NOV-09	TEMPERATURA	J	05 – NOV	21,6	19,6
NOV-09	TEMPERATURA	V	06 – NOV	19,3	19,0
NOV-09	TEMPERATURA	L	09 – NOV	21,0	19,3
NOV-09	TEMPERATURA	M	10 – NOV	20,8	18,6
NOV-09	TEMPERATURA	K	11 – NOV	20,7	18,5
NOV-09	TEMPERATURA	J	12 – NOV	20,3	18,7
NOV-09	TEMPERATURA	V	13 - NOV	21,6	19,4

DATOS DE PRESIÓN (Pascal) – DICIEMBRE

MES/AÑO	VARIABLE	DÍA	FECHA	12 HORAS	18 HORAS
DIC-09	PRESIÓN	LUN	14 – DIC	995,4	995,4
DIC-09	PRESIÓN	MAR	15 – DIC	995,2	995,0
DIC-09	PRESIÓN	MIER	16 –DIC	995,5	995,3
DIC-09	PRESIÓN	JUEV	17 –DIC	996,3	995,6
DIC-09	PRESIÓN	VIER	18 – DIC	997,0	996,9
DIC-09	PRESIÓN	SAB	19 –DIC	998,3	999,7
DIC-09	PRESIÓN	DOM	20 – DIC	1000,6	1000,5
DIC-09	PRESIÓN	LUN	21 – DIC	1002,2	1000,3
DIC-09	PRESIÓN	MAR	22 – DIC	1001,1	999,5
DIC-09	PRESIÓN	MIER	23 – DIC	999,7	998,3

DATOS DE TEMPERATURA (°C) – DICIEMBRE

MES/AÑO	VARIABLE	DÍA	FECHA	12 HORAS	18 HORAS
DIC-09	TEMPERATURA	LUN	14 – DIC	22,1	20,6
DIC-09	TEMPERATURA	MAR	15 – DIC	23,1	21,2
DIC-09	TEMPERATURA	MIER	16 – DIC	23,2	21,4
DIC-09	TEMPERATURA	JUEV	17 – DIC	24,6	22,1
DIC-09	TEMPERATURA	VIER	18 – DIC	24,8	22,8
DIC-09	TEMPERATURA	SAB	19 – DIC	23,9	21,9
DIC-09	TEMPERATURA	DOM	20 –DIC	24,3	22,1
DIC-09	TEMPERATURA	LUN	21 – DIC	22,7	22,0
DIC-09	TEMPERATURA	MAR	22 – DIC	22,4	22,0
DIC-09	TEMPERATURA	MIER	23 – DIC	21,9	21,8

ANEXO 2

VOLÚMENES CORREGIDOS (en litros) CON DATOS REALES DE PRESIÓN Y TEMPERATURA

Mes de Noviembre

FECHA	M	T	Presión mmHg	Temperatura °C	Volumen tomado	Volumen corregido
02-Nov-09	X		751,427	20,7	45	37,69
		Y	749,926	19,5	45	35,57
03-Nov-09	X		750,377	20,2	45	36,83
		Y	749,176	19,2	45	35,06
04-Nov-09	X		751,052	21,1	45	38,43
		Y	750,377	19,2	45	35,00
05-Nov-09	X		751,052	21,6	45	39,34
		Y	751,277	19,6	45	35,69
06-Nov-09	X		751,877	19,3	45	35,12
		Y	750,677	19,0	45	34,62
09-Nov-09	X		748,726	21,0	45	38,37
		Y	748,201	19,3	45	35,29
10-Nov-09	X		748,951	20,8	45	37,99
		Y	748,201	18,6	45	34,01
11-Nov-09	X		748,201	20,7	45	37,85
		Y	747,226	18,5	45	33,87
12-Nov-09	X		748,726	20,3	45	37,09
		Y	747,676	18,7	45	34,21
13-Nov-09	X		748,651	21,6	45	39,47
		Y	748,201	19,4	45	35,47

(M) Mañanas: 12.00 hrs

(T) Tardes: 18.00 hrs

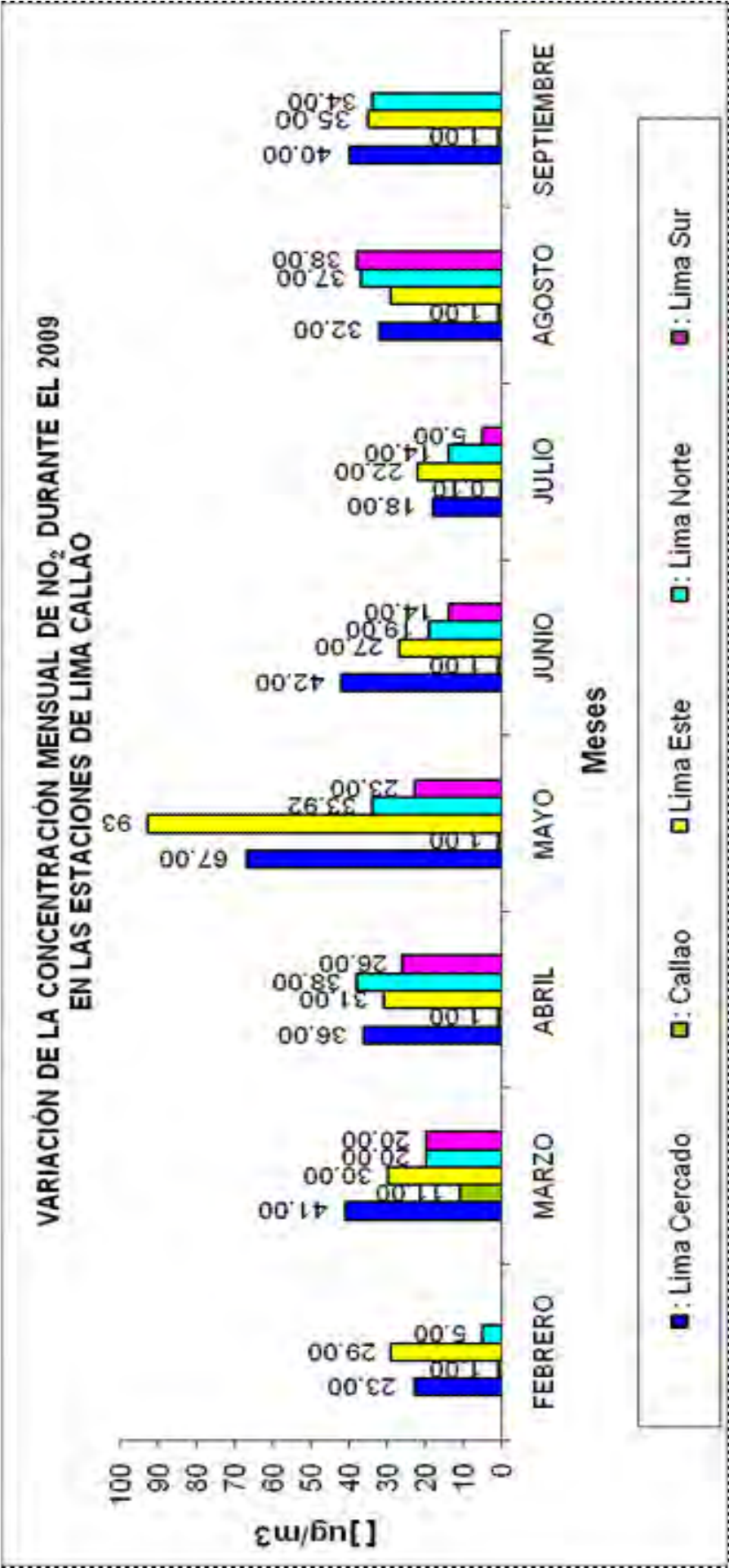
Mes de Diciembre

FECHA	M	T	Presión mmHg	Temperatura °C	Volumen tomado	Volumen corregido
14-Dic-09	X		746,626	22,1	45	40,49
		Y	746,626	20,6	45	37,74
15-Dic-09	X		746,476	23,1	45	42,33
		Y	746,326	21,2	45	38,86
16-Dic-09	X		746,701	23,2	45	42,50
		Y	746,551	21,4	45	39,21
17-Dic-09	X		747,301	24,6	45	45,03
		Y	746,776	22,1	45	40,48
18-Dic-09	X		747,826	24,8	45	45,37
		Y	747,751	22,8	45	41,71
19-Dic-09	X		748,801	23,9	45	43,66
		Y	749,851	21,9	45	39,95
20-Dic-09	X		750,527	24,3	45	44,29
		Y	750,452	22,1	45	40,29
21-Dic-09	X		751,727	22,7	45	41,31
		Y	750,301	22,0	45	40,11
22-Dic-09	X		750,902	22,4	45	40,81
		Y	749,701	22,0	45	40,14
23-Dic-09	X		749,851	21,9	45	39,95
		Y	748,801	21,8	45	39,83

(M) Mañanas: 12.00 hrs

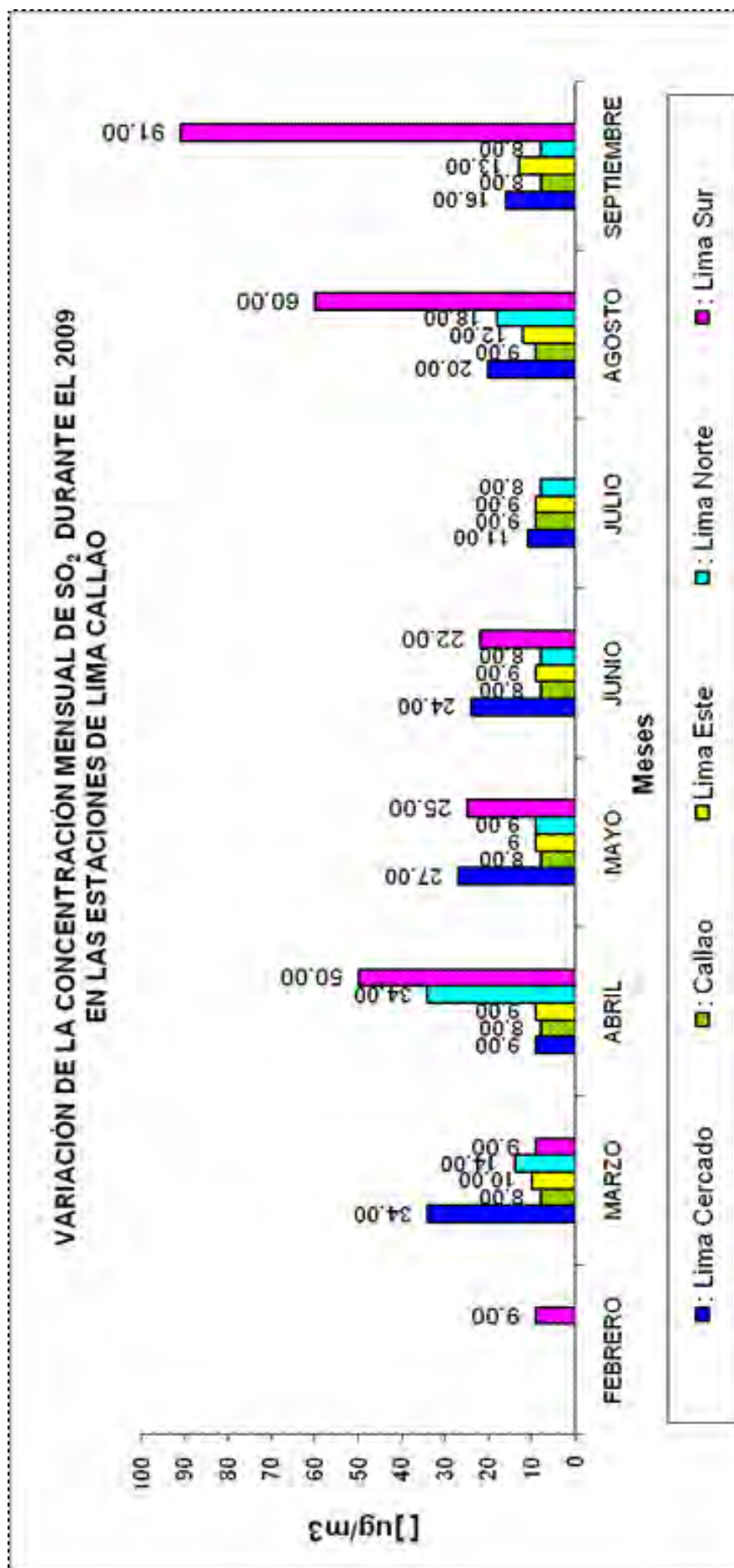
(T) Tardes: 18.00 hrs

ANEXO 3: VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN MENSUAL DE DIÓXIDO DE NITRÓGENO DURANTE EL 2009 EN LAS ESTACIONES DE LIMA Y CALLAO (DIGESA)



DIGESA, 2009

ANEXO 4: VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN MENSUAL DE DIÓXIDO DE AZUFRE DURANTE EL 2009 EN LAS ESTACIONES DE LIMA Y CALLAO (DIGESA)

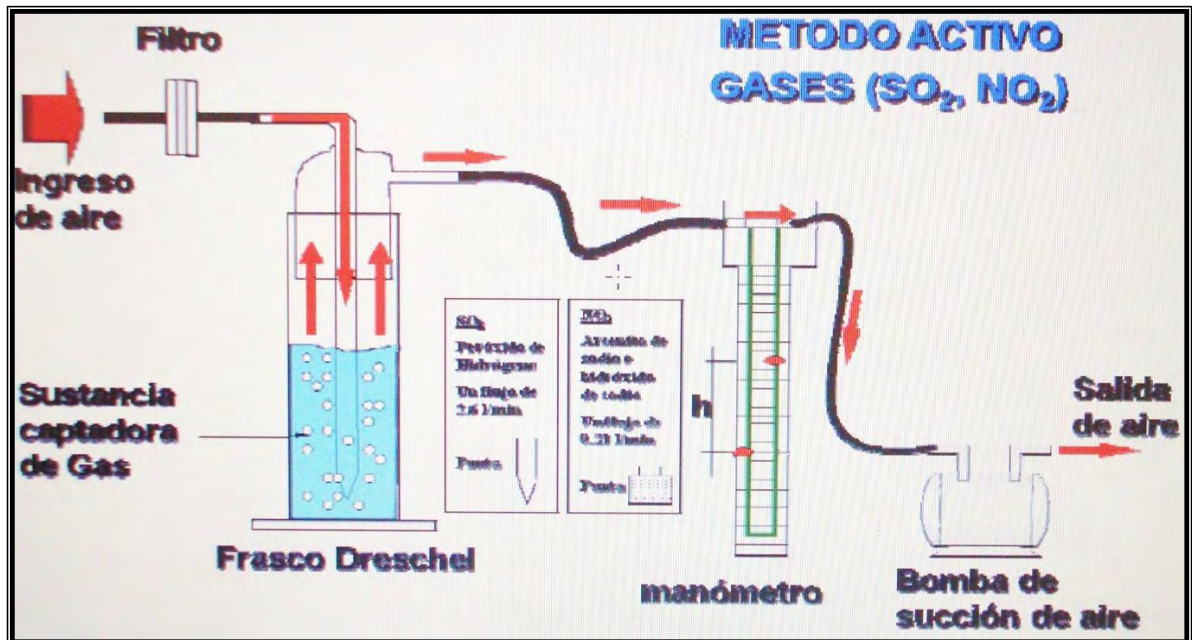


DIGESA, 2009

ANEXO 5

REGISTROS FOTOGRÁFICOS DEL EQUIPO DE TOMA DE MUESTRA

Sistema de toma de muestra



Equipo de toma de muestra, en la estación 04



ANEXO 6

REGISTROS FOTOGRÁFICOS DE LAS ESTACIONES DE MUESTREO

Estación 1 de toma de muestra (Plaza Dos de Mayo)



Estación 2 de toma de muestra (Plaza Grau)



Estación 3 de toma de muestra (Plaza Bolognesi)



Estación 4 de muestreo (Cruce Av. Abancay – Av. Nicolás de Piérola)



Estación 5 de toma de muestra (Cruce Jr. Huanta – Jr. Puno)



ANEXO 7

REGISTROS FOTOGRÁFICOS DE LOS ANÁLISIS EN EL LABORATORIO DE LA FACULTAD DE FARMACIA Y BIOQUÍMICA

